



AVALIAÇÃO MULTITÉCNICA EM HIDROGEOLOGIA AMBIENTAL E SUAS IMPLICAÇÕES NA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS

Alzira dos Anjos Castro de Medeiros Pereira
Julho de 2008



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Avaliação multitécnica em hidrogeologia ambiental e suas implicações na gestão de recursos hídricos subterrâneos

Alzira dos Anjos Castro de Medeiros Pereira



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Avaliação multitécnica em hidrogeologia ambiental e suas implicações na gestão de recursos hídricos subterrâneos

Alzira dos Anjos Castro de Medeiros Pereira

Nº Mecanográfico: 1930691

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente, realizada sob a orientação do Prof. Doutor Helder I. Chaminé, Professor Coordenador do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP e da Dra. Maria José Afonso, Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.

Júri

Presidente

Doutor José Augusto de Abreu Peixoto Fernandes

Equiparado a Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé

Professor Coordenador, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Mestre Maria José Coxito Afonso

Professora Adjunta, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor José Manuel Vaz Velho Barbosa Marques

Professor Auxiliar, Departamento de Minas e Georrecursos, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa

Agradecimentos

A elaboração deste trabalho contribuiu para um maior enriquecimento, por isso, agradeço aos meus Pais pela força e coragem que me transmitiram ao longo de todo este período.

A realização desta dissertação só foi possível com o apoio, desde os tempos do relatório final da Licenciatura, dos meus orientadores Prof. Doutor Helder I. Chaminé e Dr^a Maria José Afonso, pela dinâmica, orientação científica e entusiasmo que sempre me incutiram para eu continuar a evoluir...

Ao Laboratório de Ecotoxicologia do CIIMAR (Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental), em particular à Directora do Laboratório Professora Catedrática Doutora Lúcia Guilhermino, pelo apoio concedido à realização dum estágio de curta-duração de 3 meses em Ecotoxicologia Ambiental. À Doutora Laura Guimarães (Laboratório de Ecotoxicologia, CIIMAR) pela supervisão do trabalho prático, pelo apoio na revisão do manuscrito original e pela disponibilidade na discussão dos resultados obtidos.

À Eng^a Geóloga Ricarda Moura e ao Eng^o Geólogo Duarte, da empresa GeoSonda – Sondagens Geotécnicas e Geofísicas, Lda. que tiveram um papel fundamental na realização dos ensaios geofísicos de campo e que permitiram um estágio de campo na região do Peso da Régua.

À empresa “Águas do Porto, EM” (ex-SMAS), na pessoa do Sr. Eng^o Guilherme Fontes pela colaboração operacional imprescindível à concretização de parte deste estudo.

Aos meus colegas de curso, Ricardo Martins, Jorge Ribeiro, Pedro Moreira e Luciana Resende que me auxiliaram nos trabalhos de campo e gabinete.

Ao Dr. José Teixeira (LABCARGA-ISEP) pelo seu contributo na vectorização da cartografia em ambiente SIG. Ao Prof. Doutor Jorge Espinha Marques (Centro de Geologia da Universidade do Porto) pela partilha de elementos bibliográficos da área do Poço Quente, em Granjão.

Um agradecimento especial aos directores dos Laboratórios do ISEP, Prof. Doutor H. I. Chaminé do Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (LABCARGA) e do Prof. Doutor J. A. Fernandes do Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção (LGMC), por todas as facilidades na utilização dos recursos dos laboratórios do ISEP.

Este trabalho recebeu apoio parcial dos projectos HIMOCATCH – FCT (POCTI/CTA/44235/2002), GROUNDURBAN – FCT (POCTI/CTEGIN/59081/2004) e HIDROURBAN – LABCARGA (IPP|PADInv/2007).

Palavras-chave

Hidrogeologia, Recursos Geológicos, Geofísica Aplicada, Ecotoxicologia, Multidisciplinaridade.

Resumo

Este trabalho apresenta, numa abordagem multidisciplinar, uma combinação multitécnica das ferramentas hidrogeológicas, hidrogeofísicas e ecotoxicológicas. O estudo hidrogeofísico da área da nascente termal *Poço Quente* (Granjão, Peso da Régua), envolveu, numa primeira fase um reconhecimento geológico da área no sentido de apoiar e decidir qual a abordagem hidrogeofísica mais adequada para o local e, numa fase posterior, a cartografia aplicada, ensaios geofísicos (método electromagnético), ensaios esclerométricos e um inventário dos diversos pontos de água. Esta abordagem teve como objectivo principal a apresentação duma nova contribuição em termos da geofísica aplicada no refinamento do modelo hidrogeológico conceptual associado às águas termominerais do *Poço Quente*, bem como delinear futuras potencialidades deste georrecurso em termos do seu potencial geotérmico. Foram realizados estudos hidrogeológicos e ecotoxicológicos ao longo e na área envolvente das galerias subterrâneas, com cerca de 3 km, correspondentes ao antigo manancial de Paranhos (também conhecido como manancial da Arca d'Água), o qual constituiu, durante mais de cinco séculos, uma das principais fontes de abastecimento de água à cidade do Porto. Os resultados obtidos neste trabalho sugerem que as águas subterrâneas da cidade do Porto são adequadas para a irrigação. Esta metodologia foi extremamente valiosa no conhecimento dos sistemas de água subterrânea. Além disso, poderá ser um bom instrumento para o planeamento e a gestão dos recursos hídricos subterrâneos de uma forma sustentável.

Keywords

Hydrogeology, Geological Resources, Applied Geophysics, Ecotoxicology, Multidisciplinarity.

Abstract

This work presents, in a multidisciplinary approach, a multitechnique combination of hydrogeological, hydrogeophysical and ecotoxicological tools. The hydrogeophysical study of the *Poço Quente* (Granjão, Peso da Régua) hydromineral system implicated, in a first stage, a geological identification of the study area in order to decide the best hydrogeophysical approach for the region and, in a later phase, geological mapping, geophysical mapping (electromagnetical method), a geomechanical characterization and a water point inventory. The main goal of this project was to present a new contribution of applied geophysics on the definition of the hydrogeological model for the hydromineral system *Poço Quente*, as well as identify geothermal potentialities for this georesource. The hydrogeological and ecotoxicological of Paranhos groundwater systems (Porto city, NW Portugal) were carried out. Such study was developed in the Paranhos spring galleries catchworks (the so-called Arca d'Água underground galleries; ca. 3 km extension), which constituted for more than five centuries one of the main water supplies to Porto City. The results obtained in this study suggest that Porto urban groundwaters are suitable for irrigation uses. This methodology proved valuable in deepening our knowledge on groundwater system resources. In addition, it can provide guidelines for the planning and management of water resources in an equitable, sustainable and ethical manner.

ÍNDICE

1.INTRODUÇÃO GERAL	1
2.HIDROGEOLOGIA APLICADA	7
2.1. Considerações iniciais	9
2.2. Formações aquíferas	11
2.3. Propriedades da água: uma síntese	16
2.4. Qualidade da água subterrânea e contaminação	17
2.5. Inventário e cartografia aplicada às fontes de contaminação	21
2.6 Hidrogeologia aplicada a sistemas termominerais	23
2.6.1. Considerações iniciais	23
2.6.2 Prospeção em maciços rochosos fissurados	24
2.6.3 Energia Geotérmica: breves considerações	27
2.7. Inventário hidrogeológico	32
2.8. Cartografia hidrogeológica	32
3. GEOFÍSICA APLICADA À HIDROGEOLOGIA: OS MÉTODOS ELECTROMAGNÉTICOS	35
3.1. Introdução	37
3.2. Fundamentos teóricos	40
3.3. Procedimentos de Campo	43
3.3.1. Equipamento	43
3.3.2. Erros de Medição	45
3.3.3. Recolha dos dados de campo	46
3.4. Potencialidades e limitações do método indutivo	47
4. AVALIAÇÃO ECOTOXICOLÓGICA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA	49
4.1. Considerações gerais	51
4.2. Avaliação ecotoxicológica de água subterrânea	52
4.3. Bioensaios de toxicidade	54
4.4. Ensaio baseados em biomarcadores	56
4.5. A actividade da enzima acetilcolinesterase (AChE)	56
5. AVALIAÇÃO MULTITÉCNICA EM HIDROGEOLOGIA AMBIENTAL	59
5.1. Caso de estudo I: A área da nascente termal do Poço Quente (Granjão, Peso da Régua): contributo da geofísica aplicada	61
5.1.1. Generalidades	61
5.1.2 Enquadramento geológico e geomorfológico	62
5.1.3. Geologia, hidrogeologia e geotecnia local	66
5.1.4. Levantamento geofísico	68
5.1.4.1. Introdução	68
5.1.4.2. Metodologia	69

5.1.4.3. Levantamento geofísico de terreno	69
5.1.4.4. Interpretação geofísica: considerações conclusivas	72
5.2. Caso de estudo II: Estudo de efeitos ecotoxicológicos sub-letais da água subterrânea do Manancial de Paranhos em <i>Daphnia magna</i>	75
5.2.1. Generalidades	75
5.2.2. Enquadramentos geográfico, geológico e hidrogeológico da cidade do Porto	76
5.2.3. O Manancial de Paranhos: enquadramentos	78
5.2.3.1. Hidroquímica e fontes de contaminação: caracterização geral	81
5.3. Objectivos	82
5.4. Material e métodos	83
5.5. Resultados	91
5.5.1. Sobrevivência	91
5.5.2. Parâmetros físico-químicos	91
5.5.3. Actividade da AChE de <i>Daphnia magna</i>	96
5.6. Discussão	97
5.7. Análise de custos	100
6. CONCLUSÕES	101
7. REFERÊNCIAS	105
ANEXOS	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição da água no Planeta Terra (http://e-Geo.ineti.pt/geociencias/edicoes_online/diversos/agua_subterranea/indice.htm)	9
Figura 2 – O ciclo hidrológico (adaptado de Bastida, 2005)	11
Figura 3 – Tipos de aquíferos de acordo com a sua textura (adaptado de González de Vallejo <i>et al.</i> , 2002)	12
Figura 4 – Comportamento dos furos realizados nos aquíferos livres e confinados (http://e-Geo.ineti.pt/geociencias/edicoes_online/diversos/agua_subterranea/indice.htm)	14
Figura 5 - Processos que afectam o transporte de contaminantes (adaptado de Zaporozec, 2004)	18
Figura 6 – Poluição da água subterrânea com diferentes origens (adaptado IGM, 2001)	19
Figura 7 - Perfil esquemático de estruturas hidrogeológicas e tipos de formações aquíferos (adaptado de Rodríguez & Bedmar, 2003)	26
Figura 8 - Utilizações da energia geotérmica (adaptado de Lindal, 1973 e de Carvalho & Carvalho, 2004)	28
Figura 9 - Extracto da carta hidrogeológica de Portugal (Pedrosa, 1999; Pedrosa <i>et al.</i> , 2000)	34
Figura 10 - O campo primário H_p é gerado pelo fluxo de corrente na bobine Tx (adaptado de Keller & Frischknecht, 1982)	41
Figura 11 – Exemplo do equipamento "Geonics EM34 Ground Conductivity Meter"	43
Figura 12 - Desenho esquemático do EM34-3 (adaptado de McNeill, 1980a)	45
Figura 13 - Função da AChE a nível das sinapses colinérgicas de organismos vertebrados e invertebrados (Guilhermino, 2007)	57
Figura 14 - Mapa geológico-estrutural de Granjão, Peso da Régua (segundo Espinha Marques <i>et al.</i> , 2001a)	63
Figura 15 - Esboço geomorfológico regional e mapa hipsométrico da área do Granjão.	64
Figura 16 - Modelo digital de terreno do Granjão, com a localização da área do Poço Quente.	65
Figura 17 - Enquadramento topográfico da área do Granjão.	65
Figura 18 - Esboço geológico da área do Granjão, com a representação de um diagrama de rosetas com as direcções principais das descontinuidades da área em estudo ($n=76$ descontinuidades)	67
Figura 19 - Área em estudo da nascente termal do Poço Quente, Granjão.	70
Figura 20 - Localização dos perfis de electromagnética, na área estudada.	71
Figura 21 - Mapa interpretativo com o cruzamento dos dados geofísicos e hidrogeológicos	74
Figura 22. Caleira de granito por onde circula a água do Manancial de Paranhos.	76
Figura 23 - Enquadramento geológico da região do Porto no Norte de Portugal	77
Figura 24 - Percorso esquemático dos túneis do manancial de Paranhos	79
Figura 25 – Manancial de água subterrânea de Paranhos, na Arca Maior localizada no subsolo do jardim de Arca d'Água	79
Figura 26 – Enquadramento do túnel de Paranhos (adaptado de Seabra, 2006)	80
Figura 27 - Fotografia obtida à lupa (esquerda) e representação esquemática da anatomia (direita) de <i>Daphnia magna</i> (adaptado de Cooney, 1995)	84

Figura 28 - Bioensaio de toxicidade com <i>Daphnia magna</i> baseado na AChE para avaliação de efeitos subletais da águasubterrânea do Manancial de Paranhos	86
Figura 29 - Ajuste de pH para preparação de soluções teste a usar num bioensaio	87
Figura 30 - Preparação de homogeneizados para determinação da AChE	87
Figura 31 - Representação esquemática do princípio do método de determinação da actividade da AchE	88
Figura 32 - Sobrevivência às 24 e 48 horas de juvenis de <i>D. magna</i> em função da concentração de água subterrânea testada nos seis (1-6) ensaios de toxicidade aguda efectuados	92
Figura 33 - Actividade da AChE (em percentagem da actividade dos controlos), determinada em juvenis de <i>D. magna</i> , em função da concentração de água subterrânea do manancial de Paranhos colhida nos seis (1-6) pontos de amostragem	96
Figura 34 - Localização dos pontos de amostragem na cartografia de fontes de contaminação (segundo Afonso et al., 2007c)	99

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Distribuição da água (adaptado de UNESCO, 1992)	10
Quadro 2. Caracterização hidrogeológica das formações geológicas que têm capacidade de armazenar água (adaptado de González de Vallejo et al., 2002)	13
Quadro 3 – Valores de porosidade e permeabilidade de algumas rochas (adaptado de http://e-Geo.ineti.pt/geociencias/edicoes_online/diversos/agua_subterranea/indice.htm)	15
Quadro 4 – Métodos de classificação das fontes de contaminação das águas subterrâneas (Zaporozec, 2004).	18
Quadro 5 – Síntese das principais fontes de contaminação pela sua origem (adaptado de Zaporozec, 2004)	20
Quadro 6 - Energia disponível a partir de emergência com temperatura superior a 40º C	31
Quadro 7 - Síntese dos principais aproveitamentos geotérmicos em Portugal Continental (http://www.igm.ineti.pt/edicoes_online/boletim/vol37_2)	31
Quadro 8 - Síntese dos principais métodos geofísicos e suas aplicações	39
Quadro 9 - Profundidade de investigação do EM34-3 para as diferentes configurações possíveis (adaptado de Ogilvy et al., 1991)	44
Quadro 10 - Características físico-químicas da água termomineral do Poço Quente (sector de Granjão, Peso da Régua); segundo Espinha Marques et al. (2003)	62
Quadro 11 – Dados geotécnicos do maciço rochoso	68
Quadro 12 - Perfis de electromagnética: principais características	70
Quadro 13 - Valores de condutividade eléctrica: principais indicadores numéricos	71
Quadro 14 – Principais características das unidades hidrogeológicas (adaptado de COBA, 2003)	78
Quadro 15 - Preparação de padrões e amostras para a determinação da concentração de proteína	89
Quadro 16 - Valores médios e respectivos desvios padrão obtidos para os parâmetros físico-químicos do ensaio de toxicidade realizado com a água subterrânea recolhida no ponto 1	93
Quadro 17 - Valores médios e respectivos desvios padrão obtidos para os parâmetros físico-químicos do ensaio de toxicidade realizado com a água subterrânea recolhida no ponto 2	93
Quadro 18 - Valores médios e respectivos desvios padrão obtidos para os parâmetros físico-químicos do ensaio de toxicidade realizado com a água subterrânea recolhida no ponto 3	94
Quadro 19 - Valores médios e respectivos desvios padrão obtidos para os parâmetros físico-químicos do ensaio de toxicidade realizado com a água subterrânea recolhida no ponto 4	94
Quadro 20 - Valores médios e respectivos desvios padrão obtidos para os parâmetros físico-químicos do ensaio de toxicidade realizado com a água subterrânea recolhida no ponto 5	95
Quadro 21 - Valores médios e respectivos desvios padrão obtidos para os parâmetros físico-químicos do ensaio de toxicidade realizado com a água subterrânea recolhida no ponto 6	95
Quadro 22 - Diversas fases constituintes do trabalho e respectivos custos associados ao Projecto	100

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 – Pannel de fotos da localização área em estudo

Anexo 2 – Planta de localização de perfis de geofísica (electromagnética)

Anexo 3 – Secções de condutividade eléctrica (Perfil P1 e Perfil P2)

Anexo 4 – Secções de condutividade eléctrica (Perfil P3 e Perfil P4)

Anexo 5 – Secções de condutividade eléctrica (Perfil P5)

Anexo 6 – Mapeamento electromagnético

Anexo 7 – Fichas de campos (geofísica)

Anexo 8 – Fichas de inventário

Anexo 9 – Ficha de estações geomecânicas

1

INTRODUÇÃO GERAL

1. INTRODUÇÃO GERAL

Este trabalho enquadra-se na Unidade Curricular Dissertação/Projecto/Estágio, do 2º ano, do Curso de Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente do Departamento de Engenharia Geotécnica do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) do Politécnico do Porto.

O presente trabalho insere-se, ainda, ao abrigo dos projectos HIMOCATCH (POCTI/CTA/44235/2002) e GROUNDURBAN (POCTI/CTE-GIN/59081/2004) — consultar Afonso et al. (2007b) — financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), integrado na linha de investigação de Recursos Hídricos Subterrâneos do NW de Portugal em desenvolvimento no Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada (LABCARGA) do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP, em parceria com o Centro GeoBioTec (Grupo de Georrecursos, Geotecnia e Geomateriais) da Universidade de Aveiro e outras instituições, nomeadamente o Centro de Petrologia e Geoquímica (CEPGIST) do Instituto Superior Técnico, o Centro de Geologia da Universidade do Porto e o Laboratório de Ecotoxicologia do Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental (CIIMAR).

O objectivo principal da presente dissertação visa apresentar a importância do cruzamento de ferramentas e da avaliação multitécnica aplicadas à hidrogeologia e ao geoambiente e suas implicações na gestão de recursos hídricos subterrâneos. Para o efeito, optou-se por desenvolver esta abordagem em dois sectores, em contextos geológicos distintos, com ferramentas complementares e diferentes (e.g. hidrogeofísica, hidrogeologia e ecotoxicologia ambientais), mas com um âmbito comum que é a água subterrânea.

Um dos objectivos do estudo ora desenvolvido consiste na apresentação duma nova contribuição em termos da geofísica aplicada e hidrogeofísica para o refinamento do modelo hidrogeológico conceptual associado às águas termominerais do denominado Poço Quente (Espinha Marques, 2001; Espinha Marques et al., 2001a,b), bem como delinear futuras potencialidades deste recurso hídrico e contribuir para uma avaliação preliminar do potencial geotérmico de baixa entalpia.

O lugar do Poço Quente situa-se próximo ao lugar da Quinta da Esperança, localidade de Granjão, a cerca de 800m para NW das Caldas de Moledo e aproximadamente 300 m para NNE da ponte do Granjão (Peso da Régua, N de Portugal). A geologia estrutural da área do Granjão é conhecida através de trabalhos realizados, em particular, por Espinha Marques et al. (2001a,b), o

que permitiu optar por ensaios geofísicos (método electromagnético). Assim, realizaram-se uma série de perfis electromagnéticos para detectar possíveis anomalias, visando definir potenciais zonas de interesse hidrogeológico. Como objectivo complementar apresenta-se uma caracterização hidrogeológica e geotécnica do maciço rochoso do Poço Quente. Esta abordagem permitirá assim, grosso modo, avaliar a condutividade estrutural do maciço, bem como perspectivar e tecer algumas considerações em relação ao maciço em questão, face à orientação de novas investigações futuras. Recorreu-se, na medida do possível, à terminologia e às recomendações propostas pela ISRM – *International Society for Rock Mechanics* (ISRM 1978, 1981), GSE – *Geological Society Engineering Group Working Party Report* (GSE, 1995) e CFCFF – *Committee on Fracture Characterization and Fluid Flow* (CFCFF, 1996).

Este trabalho desenvolveu-se, numa primeira fase, com uma componente de campo propriamente dita, que decorreu nos meses de Maio e Junho de 2005; tendo sido realizado pela signatária deste projecto e, por vezes, coadjuvada pelos colegas Ricardo Martins e Pedro Moreira, sob coordenação da Eng^a R. Moura (GeoSonda) e do Prof. Helder I. Chaminé (ISEP). Iniciou-se com um reconhecimento geológico da área em estudo para apoiar e decidir qual seria a abordagem hidrogeofísica mais adequada para o local. Posteriormente, realizou-se cartografia aplicada, ensaios geofísicos (método electromagnético), ensaios esclerométricos, assim como, se procedeu a um inventário dos vários pontos de água, determinando alguns parâmetros físico-químicos das águas da área do Granjão. Por fim, efectuou-se em gabinete uma confrontação e processamento dos dados geológico-geotécnicos de reconhecimento de campo com os obtidos no levantamento geofísico. Este trabalho incorpora, actualiza e expande o relatório de Medeiros Pereira (2005) e enquadra-se como um contributo para o projecto HIMOCATCH (POCTI/CTA/44235/2002).

O segundo grande objectivo prende-se com um contributo para uma abordagem geoambiental, recorrendo a uma avaliação multitécnica ecotoxicológica e hidrogeológica da qualidade das águas subterrâneas do maciço granítico dos subterrâneos de Paranhos, em plena cidade do Porto. Para tal, recorreu-se à rede de túneis da cidade correspondentes ao antigo manancial de Paranhos (também conhecido como o manancial da Arca d'Água ou da Arca das Três Fontes), o qual constituiu, durante mais de cinco Séculos, uma das principais fontes de abastecimento de água da população da cidade do Porto (e.g., Bourbon de Noronha, 1885; Ferreira da Silva, 1889; Fontes, 1908; SMAS, 1961; Amorim & Pinto, 2001). Actualmente, a maior parte desta rede de túneis encontra-se sob a tutela da empresa “Águas do Porto, E.M.” (ex-SMAS Porto). Os resultados obtidos em estudos anteriores, sugerem que, as águas subterrâneas da área urbana do Porto não são próprias para consumo humano, mas poderão ser adequadas para, por exemplo, a irrigação de jardins públicos (Afonso et al., 2006a,b, 2007a,c).

A parte experimental da ecotoxicologia foi realizada no Laboratório de Ecotoxicologia do Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental (CIIMAR), que tem como principal missão a investigação, o ensino, e a divulgação em ecotoxicologia aquática. Os trabalhos de ecotoxicologia ambiental foram realizados, no âmbito dum estágio de curta-duração, no Laboratório de Ecotoxicologia do CIIMAR, sob a coordenação da investigadora auxiliar Doutora Laura Guimarães e da Prof^a Doutora Lúcia Guilhermino. O presente trabalho integra e actualiza alguns dados hidrogeológicos e ecotoxicológicos apresentados em Seabra (2006) e Costa Cruz (2007), bem como alguns dados inéditos da investigação de doutoramento, em curso, de M. J. Afonso (*in prep.*) e dos elementos dos projectos GROUNDURBAN-FCT [POCTI/CTE-GIN/59081/2004] e HIDROURBAN-LABCARGA [IPP|PADInv/2007] (*Hidrogeologia, geomecânica e geoconservação de antigas minas de água: contribuição para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos em áreas urbanas e peri-urbanas*).

Este estudo foi realizado em alguns pontos das galerias subterrâneas da rede de túneis de Paranhos, com cerca de 3000m de extensão, durante os meses de Fevereiro a Abril de 2008, totalizando nove dias de campo englobando trabalho de reconhecimento hidrogeológico e de colheita de amostras de água subterrânea para as análises ecotoxicológicas.

2

HIDROGEOLOGIA APLICADA

2. HIDROGEOLOGIA APLICADA

2.1. Considerações iniciais

A água é um recurso natural essencial para todas as formas de vida presentes no planeta. Apenas uma pequena fracção corresponde a água doce e desta, somente 1% se encontra acessível para a utilização humana. Porém, não obstante a ínfima quantidade de água disponível, o Homem tem vindo a poluir cada vez mais este recurso, provocando uma profunda alteração nos ecossistemas aquáticos. Assim, a actividade humana assume-se como umas das principais causas do impacto sobre os recursos hídricos.

Aparentemente, a Terra dispõe de uma enorme quantidade de água (Figura 1), cerca de 97% de toda a água existente está nos oceanos, os restantes 3% encontra-se distribuída pelos icebergs e glaciares, água subterrâneas, águas superficiais, lagos, rios, e atmosfera. Da magra fatia dos 3%, cerca de 77% está retida nos icebergs e glaciares, 22% constituem a água subterrânea, e o restante 1% (água superficial, lagos, rios e atmosfera) é o que está disponível para consumo humano, agrícola e industrial.

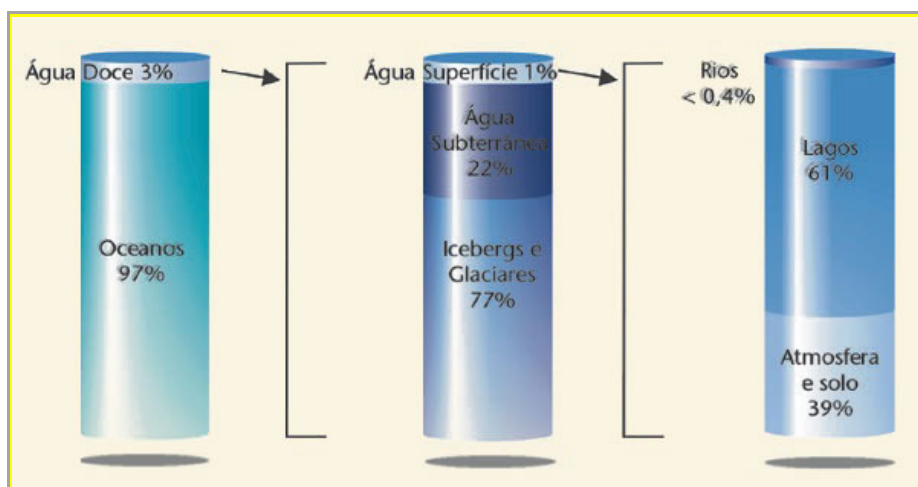


Figura 1 – Distribuição da água no Planeta Terra
(http://e-Geo.ineti.pt/geociencias/edicoes_online/diversos/agua_subterranea/indice.htm).

A água é o recurso natural mais abundante do planeta, imprescindível para a vida e a integridade dos ecossistemas (sem ela a vida cessaria na terra), circula continuamente na Natureza, e está em constante renovação. O seu ciclo que afecta a distribuição e movimento da água ao nível de todo o globo envolve processos de transporte, armazenamento temporário e alterações do seu estado físico; podendo passar pelos diferentes estados – *sólido, líquido e gasoso*. O conceito de ciclo hidrológico (figura 2) está ligado ao movimento e à troca de água nos

seus diferentes estados físicos, que ocorre na Hidrosfera, entre os oceanos, as calotes de gelo, as águas superficiais, as águas subterrâneas e a atmosfera. Este movimento permanente deve-se ao Sol, que fornece a energia para elevar a água da superfície terrestre para a atmosfera – *evaporação* e à gravidade, que faz com que a água condensada caia – *precipitação* (no entanto, nem toda a água precipitada alcança a superfície terrestre, já que uma parte, na sua queda, volta a evaporar-se.) e que, uma vez na superfície, circule através de linhas de água que se reúnem em rios até atingir os oceanos – *escoamento superficial* ou se infiltre nos solos e nas rochas, através dos seus poros, fissuras e fracturas – *escoamento subterrâneo*.

O quadro 1 mostra a distribuição da água no planeta em termos de volume armazenado nos diferentes reservatórios.

Quadro 1 – Distribuição da água (adaptado de UNESCO, 1992).

Reservatórios	Volume aproximado (km ³)	Percentagem total
Oceanos	1 340 000 000	96,40
Glaciares	24 000 000	1,72
Águas subterrâneas	24 000 000	1,72
Lagos e pântanos	176 400	0,013
Humidade do solo	16 500	0,001
Atmosfera	13 000	0,001
Rios	2 120	0,00015
Água biológica	1 120	0,0001
Volume de água total	1 390 000 000	100

A água que se infiltra no solo é sujeita a evaporação directa para a atmosfera e é retida pela vegetação, que através da transpiração, a devolve à atmosfera – *evapotranspiração*. A água que continua a infiltrar-se e atinge a zona saturada das rochas, entra na circulação subterrânea e contribui para um aumento da água armazenada – *recarga dos aquíferos*. A água subterrânea pode reaparecer à superfície – *nascentes* e alimentar as linhas de água ou ser descarregada directamente no oceano. A quantidade de água e a velocidade a que esta circula nas diferentes etapas do ciclo hidrológico são influenciadas por diversos factores como, por exemplo, o coberto vegetal, altitude, topografia, temperatura, tipo de solo e geologia. O ciclo hidrológico é também um agente modelador da crusta terrestre, uma vez que a água é um agente erosivo, responsável pelo transporte e pela deposição de sedimentos.

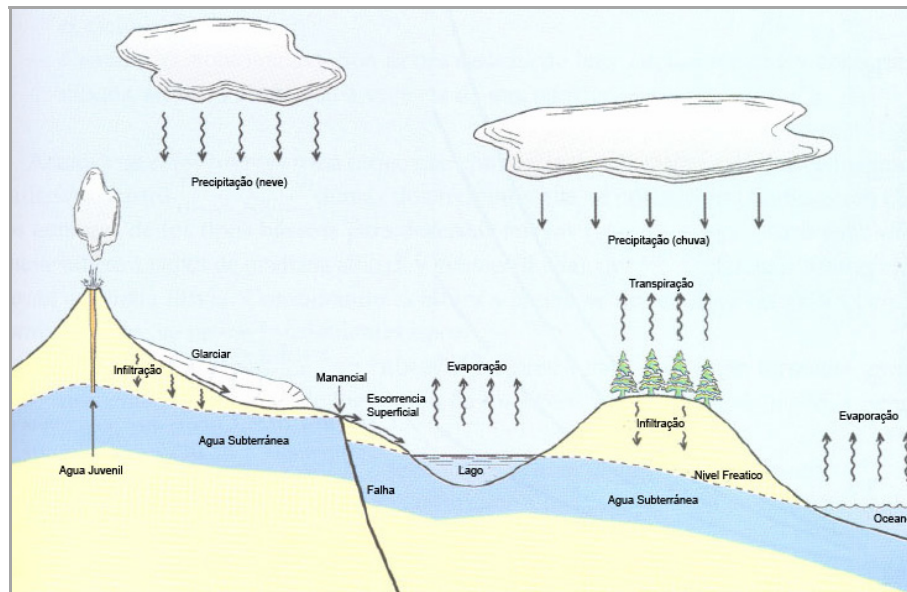


Figura 2 – O ciclo hidrológico (adaptado de Bastida, 2005).

Os recursos hídricos subterrâneos têm desempenhado, desde tempos remotos, um importante papel, quer no abastecimento de água potável às populações, quer na agricultura e, mais tarde na indústria. De um modo geral, estes reservatórios subterrâneos constituem as primeiras origens da água, sobretudo em regiões onde os recursos hídricos superficiais são escassos (Carvalho & Amador, 2002).

2.2. Formações aquíferas

Os aquíferos devem ser entendidos como formações geológicas subterrâneas permeáveis, susceptíveis de armazenar e transmitir água. Assim, uma formação geológica para ser classificada como aquífero deve conter poros, fissuras/fracturas e/ou cavidades (cársicas), ou seja, espaços vazios, que permitem a circulação e a mobilidade da água. Desta forma, sob o ponto de vista estrutural /textura (figura 3), podemos dizer que existem três tipos de aquíferos (IGM, 2001; González de Vallejo et al., 2002):

- Porosos – cuja permeabilidade é devida à porosidade intragranular, onde a água armazenada circula através de poros que constituem o reservatório geológico, sendo estes os mais importantes aquíferos, pelo grande volume de água que armazenam, e a sua porosidade quase sempre distribuída de forma homogênea, permitindo que a água flua para qualquer direcção, como exemplo típico são as areias e cascalheiras dos depósitos aluvionares;

- Fissurados – quando permeabilidade do reservatório geológico é devida a fissuras e fendas de origem mecânica mais ou menos contínuas, onde a capacidade armazenar água está relacionada à quantidade de fracturação e sua abertura, como é o caso das rochas graníticas e dos xistos; filões de quartzo, etc.
- Cársicos – quando as acções mecânicas e químicas geram cavidades (onde a água circula em condutas que resultaram do alargamento de diáclases) de dissolução que no limite, havendo continuidade hidráulica, constituem cursos de água subterrâneos. Estes reservatórios são característicos de rochas solúveis, nomeadamente, calcários e dolomias.

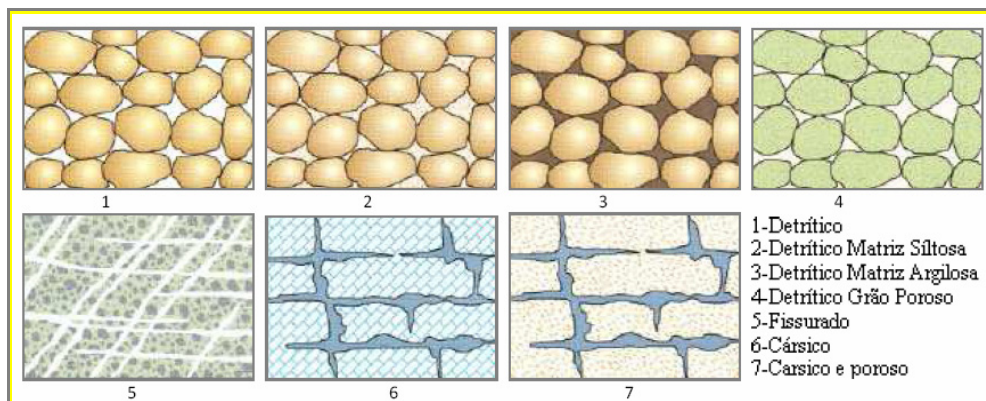


Figura 3 – Tipos de aquíferos de acordo com a sua textura (adaptado de González de Vallejo *et al.*, 2002).

As formações da zona saturada com características para armazenar água são geralmente designadas por formações aquíferas (Custodio & Llamas, 2001). Na natureza existe uma ampla gama de formações com capacidade muito diversa de armazenar e transmitir a água, do ponto de vista hidrológico (quadro 2), e de acordo com as suas características estruturais e hidráulicas, os aquíferos podem ser classificados, em quatro tipos (e.g., Custodio & Llamas, 2001; Fetter, 2001; González de Vallejo *et al.*, 2002):

- Aquífero - Formação geológica com capacidade de armazenar e transmitir a água (permite a sua circulação) e cuja exploração é economicamente rentável.
- Aquitardo – Formação geológica que pode armazenar água mas que a transmite lentamente não sendo rentável o seu aproveitamento a partir de poços.
- Aquicludo – Formação geológica que pode armazenar água mas não a transmite (a água não circula).
- Aquífugo – Formação geológica impermeável que não armazena nem transmite água.

Quadro 2. Caracterização hidrogeológica das formações geológicas que têm capacidade de armazenar água (adaptado de González de Vallejo et al., 2002).

Formações geológicas	Característica das formações	Capacidade para armazenar água	Capacidade para drenar água	Capacidade para transmitir água
Aquífero	Cascalhos, areias, calcários	Alta	Alta	Alta
Aquitardo	Siltos, areias siltosas e argilosas	Alta	Média a Baixa	Baixa
Aquicludo	Argilas	Alta	Muito Baixa	Nula
Aquífugo	Mármore, granitos, gnaisses	Muito Baixa a Nula	Muito Baixa a Nula	Muito Baixa a Nula

Classificando os aquíferos, em termos de jazida, e de acordo com as suas características estruturais e hidráulicas, estes podem funcionar da seguinte forma (González de Vallejo et al., 2002), em três tipos, a saber:

- Aquífero livre: Formação geológica permeável e parcialmente saturada de água. É limitado na base por uma camada impermeável. O nível da água no aquífero está à pressão atmosférica.
- Aquífero confinado: Formação geológica permeável e completamente saturada de água. É limitado no topo e na base por formações impermeáveis. A pressão da água no aquífero é superior à pressão atmosférica.
- Aquífero semi-confinado: Sistema físico integrado por um aquífero superior bem alimentado, uma camada semi-permeável ou quitardo e um aquífero inferior semi-confinado; a diferença de níveis entre o aquífero superior e o inferior acarreta uma transferência de água na vertical que alimenta o aquífero inferior.

Na realização de furos em aquíferos livres e em aquíferos confinados (figura 4) pode-se verificar que: i) no furo do aquífero confinado a água subirá acima do tecto do aquífero devido à pressão exercida pelo peso das camadas confinantes e sobrejacentes. A altura a que a água sobe designa-se por nível piezométrico e o furo será artesiano. Caso a água atinja a superfície do terreno sob a forma de repuxo então o furo artesiano será repuxante; ii) no caso do aquífero livre

o nível da água não sobe e corresponde ao nível da água no aquífero, porque a água se encontra à mesma pressão atmosférica, designando-se por nível piezométrico.

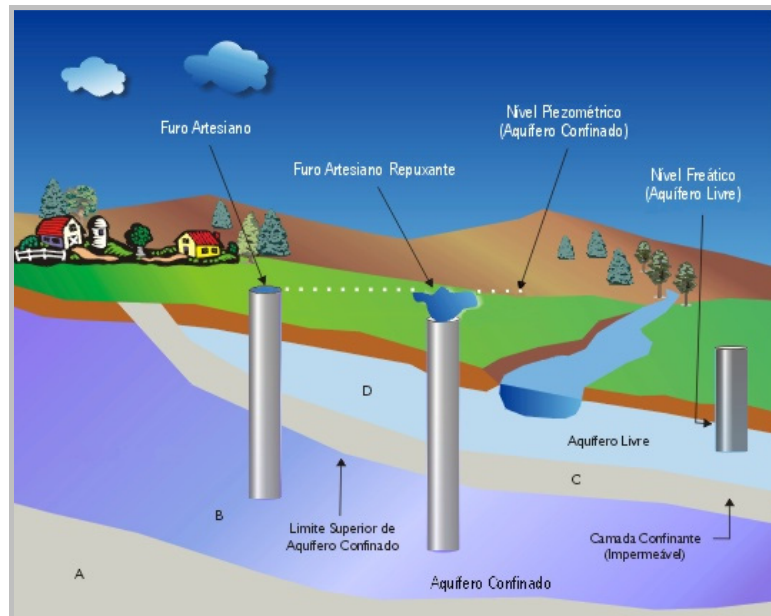


Figura 4 – Comportamento dos furos realizados nos aquíferos livres e confinados (http://e-Geo.ineti.pt/geociencias/edicoes_online/diversos/agua_subterranea/indice.htm).

Para existir água subterrânea ela terá de conseguir atravessar e circular através das formações geológicas que têm de ser porosas e permeáveis. O conceito de porosidade é estático, correspondendo à razão entre o volume de vazios (poros) e o volume total da rocha. A designação de poros aplica-se, fundamentalmente, a materiais não consolidados (e.g., cascalheiras) ou materiais detríticos consolidados (e.g., arenitos). Em formações rochosas cristalinas, como é o caso dos granitóides, os espaços vazios resultam, essencialmente, da fracturação (diaclasses e falhas) e da alteração. Por outro lado, a permeabilidade ou condutividade hidráulica é um conceito dinâmico, que se expressa como uma velocidade, podendo ser definida como a capacidade do meio rochoso em deixar fluir a água através das suas cavidades ou vazios. Esta capacidade depende da conexão e/ou da abertura dos poros, os quais condicionam a passagem da água através das formações. Uma formação muito porosa pode ser muito permeável se os seus poros são grandes e bem interconectados, tal como sucede nas areias limpas, ou pode ser quase impermeável se, apesar de ter muitos poros, estes forem pequenos e se encontrarem semi-fechados, como sucede nas argilas ou em certos materiais vulcânicos.

A permeabilidade da matriz rochosa é intergranular e a água transmite-se através dos poros e microfissuras interconectados da rocha, definindo-se como permeabilidade primária. Em geral, as formações de baixa porosidade tendem a ser pouco permeáveis uma vez que as conexões

entre os poros são difíceis de estabelecer, como sucede nas rochas metamórficas e nas ígneas. Nos maciços rochosos, a água flui essencialmente, através das superfícies das discontinuidades (diaclases, falhas), definindo-se como permeabilidade secundária. Em geral, a permeabilidade da matriz rochosa é desprezável no que diz respeito ao maciço rochoso fracturado, com excepção de algumas rochas porosas, como os arenitos, nas quais o fluxo da água se pode efectuar através da própria matriz rochosa. O fluxo da água num maciço rochoso fracturado depende da abertura das discontinuidades, a qual por sua vez depende do esforço normal exercido sobre elas, e a sua interacção. Este esforço aumenta com a profundidade e a partir de um determinado nível as discontinuidades aparecem fechadas, resumindo-se a permeabilidade do maciço ao da matriz rochosa.

No quadro 3 refere a relação entre os valores da porosidade e os valores da permeabilidade de algumas rochas (sedimentares).

Quadro 3 – Valores de porosidade e permeabilidade de algumas rochas
(adaptado de http://e-Geo.ineti.pt/geociencias/edicoes_online/diversos/agua_subterranea/indice.htm).

Tipos de rocha	Porosidade (%)	Permeabilidade (m/dia)
Cascalheira	30	>1000
Areia	35	10 a 5
Argila	45	<0,001

Relativamente à transmissividade, este é um parâmetro hidrogeológico que corresponde à capacidade de um meio para transmitir água. Pode ser definido como a quantidade de água que se escoar através da secção vertical do aquífero quando se diminui a carga hidráulica de uma unidade e expressa-se em m^2/dia ou cm^2/s . É calculada através do produto da condutividade hidráulica pela espessura saturada do aquífero.

2.3. Propriedades da água: uma síntese

A vida e o sustento da humanidade dependem da água. A procura de água doce aumenta continuamente ao ritmo do crescimento populacional. É impossível manter o fornecimento de água doce de qualidade para abastecimento humano, indústria e agricultura se a água subterrânea não for aproveitada, sendo esta a maior e mais segura de todas as fontes de água potável existentes na Terra. A qualidade da água decifra-se pela adequação desta para um determinado fim, tal como consumo doméstico, agricultura, indústria, produção de energia, entre outros. No entanto para garantir com rigor a sua qualidade é fundamental recorrer a análises cuidadosas a diversos parâmetros (Mendes & Oliveira, 2004):

- Organolépticos – estes são avaliados mediante os sentidos, o que poderá levantar alguma subjectividade na sua análise;
- Físicos - são avaliados recorrendo a procedimentos específicos;
- Químicos - avaliam-se recorrendo a ensaios experimentais através de procedimentos permitindo identificar quantitativamente diversos parâmetros.

Desta forma, a legislação estabelece diversas normas que permitem avaliar a qualidade da água através de um conjunto de referência dos principais parâmetros.

Para se poder catalogar a água como potável ou imprópria para consumo devem ser satisfeitas as seguintes condições (Mendes & Oliveira, 2004):

- Qualitativas - não ter cheiro, não ter sabor, não se alterar com o tempo e, em repouso, não deixar depósito;
- Quantitativas - $5,0 < \text{pH} < 8,5$; teor em cloretos $< 150 \text{ mg/l}$; teor em nitratos $< 1,5 \text{ mg/l}$; teor em matéria oxidante expressa em oxigénio $< 2,0 \text{ mg/l}$; resíduo seco $< 1000 \text{ mg/l}$; não deve conter amoníaco e bactérias patogénicas; entre outros.

A existência de algumas destas substâncias e a eliminação de outras concedem à água certas características ou qualidades, tais como (Mendes & Oliveira, 2004):

- Químicas – aquando da sua infiltração e circulação a água, com o seu poder de dissolução, vai acumulando vários sais minerais. O teor em substâncias dissolvidas deriva do tipo de rochas que a água atravessa; as águas das regiões calcárias são, por exemplo, muito mineralizadas, enquanto que as águas de regiões arenosas são pouco mineralizadas;
- Bacteriológicas – enquanto a água circula pelas rochas sofrem uma filtração que certifica a pureza da água. A operação de filtração é muito mais eficiente nas formações arenosas e nas aluviões do que em terrenos fissurados. É, essencialmente, na zona de aeração que se verifica a purificação da água e a destruição de bactérias por oxidação ou por acção de outros organismos que delas se alimentam;
- Térmicas – as águas subterrâneas com pouca profundidade são muito influenciadas pelas temperaturas do solo. A temperatura da água, localizada a poucas dezenas de metros de profundidade, é mais ou menos constante e análoga à temperatura da superfície; já a temperatura da água que se encontra a alguma profundidade sofre influência do gradiente geotérmico (1°C por cada 33m); assim, os aquíferos profundos poderão conter água quente.

2.4. Qualidade da água subterrânea e contaminação

A qualidade da água subterrânea refere-se às suas características físicas, químicas e biológicas e a sua relação com o fim a que a água se destina. A qualidade da água subterrânea é ameaçada, principalmente, pela actividade do Homem, embora algumas substâncias prejudiciais possam ser, por vezes, introduzidas por processos naturais (Zaporozec, 2004). O termo contaminação é segundo a Organização Mundial de Saúde (UNESCO, 1992): a introdução na água de qualquer substância indesejável e que a água normalmente não contém (e.g. microorganismos, químicos, etc.), a qual torna a água imprópria para o fim a que se destina. Este capítulo seguiu de perto os trabalhos de Foster et al. (2002), de Kovalevsky et al. (2004) e de Zaporozec (2004).

Para os agentes contaminantes se difundirem no sistema de água subterrânea precisam, necessariamente, de um mecanismo de transporte (e.g. água). Assim, quando o contaminante alcança a zona saturada ou não-saturada o seu destino é determinado por diversos processos, a saber (figura 5):

- Processos físicos: filtração, evaporação, dispersão, etc.;
- Processos geoquímicos: reacções ácido-base, trocas iónicas, oxidação–redução, precipitação–dissolução, etc.; Processos bioquímicos: respiração bacteriana, transpiração, etc.

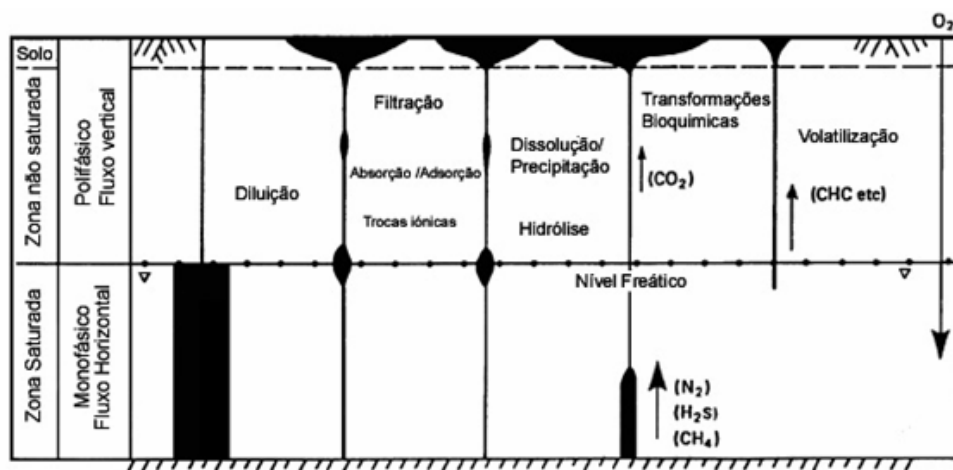


Figura 5 - Processos que afectam o transporte de contaminantes (adaptado de Zaporozec, 2004).

De acordo com Fetter (1993) e Zaporozec & Miller (2000) as causas e as fontes de contaminação da água subterrânea são inúmeras e tão diversas como as actividades humanas. O aumento do número das fontes potenciais de contaminação despontou também a necessidade de as classificar, surgindo dessa forma diversas categorias e métodos (quadro 4).

Quadro 4 – Métodos de classificação das fontes de contaminação das águas subterrâneas (Zaporozec, 2004).

Classificação	Exemplos
Pelo modo de libertação	Fontes de descarga e de transporte
Pela origem	Fontes domésticas e agrícolas
Pelas características químicas	Metais pesados; hidrocarbonetos; pesticidas
Pela localização	À superfície; no subsolo
Pelo tipo	Fontes pontuais, difusas e lineares

Uma primeira classificação foi desenvolvida pela Agência de Protecção Ambiental dos Estados Unidos da América (EPA, 1977). As fontes de contaminação eram divididas em quatro categorias usando como critério a forma como os contaminantes eram libertados. Em 1984, o

Departamento de Avaliação Tecnológica dos Estados Unidos (OTA, 1984) reviu esta classificação e expandiu a proposta para seis categorias. A classificação das fontes de contaminação pelas características químicas ou pela localização tem sido considerada por alguns cientistas. A classificação em termos químicos e biológicos pode incluir um amplo rol de categorias tais como compostos orgânicos e inorgânicos, espécies bacteriológicas, entre outros. A classificação baseada no tipo categoriza as fontes em pontuais, lineares e difusas. Nas fontes pontuais os contaminantes estão confinados a uma área restrita, de dimensões bem definidas, como por exemplo as lixeiras. As fontes lineares e difusas espalham os contaminantes ao longo de áreas mais extensas; são exemplos as linhas de água e as estradas.

Por fim, a classificação pela origem é aquela que tem sido mais usada nas últimas décadas. Actualmente, este tipo de classificação alia, frequentemente, o tipo de fonte (e.g. industrial) ao tipo de composto químico. Esta classificação tornou-se bastante popular em países que tiveram um crescimento muito rápido ao nível da agricultura e da indústria, devido ao facto de ter uma nomenclatura de fácil compreensão e por ser flexível. No quadro 5 apresenta-se esta classificação. A deterioração da qualidade da água subterrânea pode ser provocada de maneira directa ou indirecta, por actividades humanas ou por processos naturais, sendo mais frequente a acção combinada de ambos os factores (figura 6).

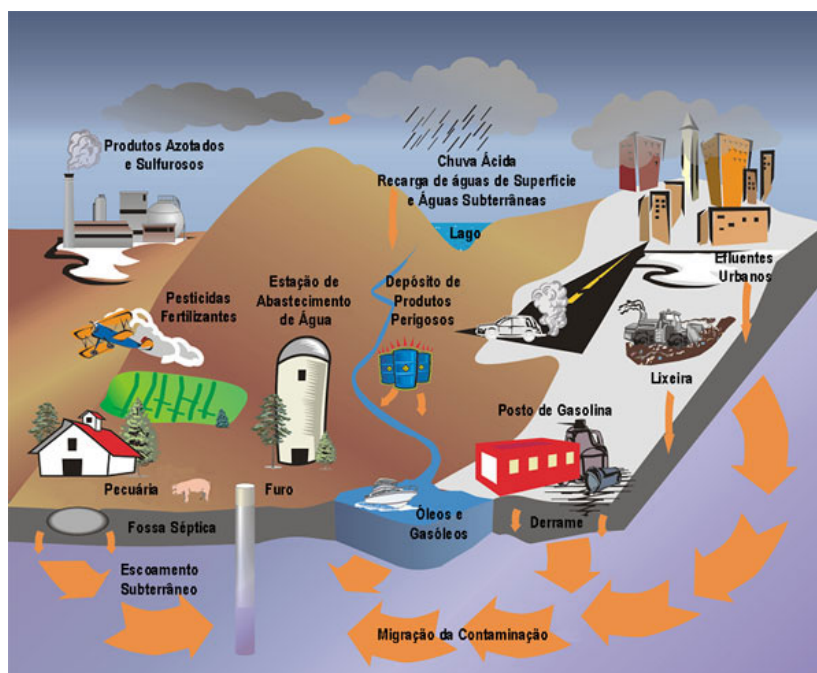


Figura 6 – Poluição da água subterrânea com diferentes origens (adaptado IGM, 2001)

Quadro 5 – Síntese das principais fontes de contaminação pela sua origem (adaptado de Zaporozec, 2004).

Categoria	Tipo de fonte	Tipologia	Localização
Fontes Naturais	Substâncias Inorgânicas	Não aplicável	Não aplicável
	Metais vestigiários		
	Compostos orgânicos		
	Microorganismos		
	Radionuclídeos		
Agricultura e Silvicultura	Fertilizantes	Difusa	Superfície
	Pesticidas	Difusa	Superfície
	Dejectos animais	Difusa / Pontual	Superfície/zona não saturada
	Rações para animais	Pontual	Superfície
	Irrigação	Difusa	Superfície
Urbanização	Lixeiras	Pontual	Superfície/zona não saturada
	Sanitários	Pontual	Superfície/zona não saturada
	Águas residuais, efluentes	Pontual e Linear	Superfície/zona não saturada
	Entulheiras	Pontual	Superfície/zona não saturada
	Fugas de reservatórios subterrâneos	Pontual	Zona não saturada
	Escoamentos, Fugas, Derramamentos	Linear e pontual	Superfície
Indústrias e Explorações Mineiras	Resíduos mineiros/Escórias/Escombreyras	Pontual	Superfície/zona não saturada
	Água de mina	Pontual e Linear	Diversas
	Resíduos sólidos	Pontual	Superfície/zona não saturada
	Águas residuais, efluentes	Pontual e Linear	Superfície/zona não saturada
	Poços de injeção	Pontual	Abaixo do nível freático
	Derramamentos, Fugas	Pontual	Superfície
Má Gestão de Água	Intrusão salina	Linear	Abaixo do nível freático
	Construção deficiente de poços/furos	Pontual	Abaixo do nível freático
	Poços/Furos abandonados	Pontual	Abaixo do nível freático
	Práticas de irrigação	Difusa	Superfície
Diversos	Fontes transportadas pelo ar	Difusa	Superfície
	Águas superficiais	Linear	Abaixo do nível freático
	Transportes	Pontual e Linear	Superfície/zona não saturada
	Desastres naturais	Pontual e Linear	Superfície/zona não saturada
	Cemitérios	Pontual	Zona não saturada

2.5. Inventário e cartografia aplicada às fontes de contaminação

O inventário das fontes de contaminação é um processo pormenorizado e sistemático onde as potenciais ameaças à qualidade das águas subterrâneas podem ser avaliadas. Este processo engloba várias etapas sequenciais. Primeiramente, elabora-se um inventário preliminar meramente indicativo de contaminantes, tendo em conta a área a estudar e, principalmente, o objectivo do projecto com base nas exigências e necessidades. Esta etapa envolve, obrigatoriamente, um trabalho prévio de gabinete e, conseqüentemente, uma pesquisa exaustiva de informação que permitirá organizar um inventário primário. O objectivo e dimensão do trabalho dependerão do tempo e dos recursos humanos e financeiros disponíveis.

Numa segunda etapa, procede-se a uma organização do inventário onde se pretende que estejam garantidas algumas condições, a saber: i) seleccionar a base cartográfica de trabalho; ii) elaborar uma lista provisória de potenciais fontes de contaminação; iii) identificar as fontes de informação e registar os endereços e outros contactos para posterior confirmação no terreno; iv) escolher os métodos de identificação das fontes de contaminação; v) preparar as fichas de inventário; vi) providenciar os equipamentos necessários (GPS – *Global Positioning System*, máquina fotográfica, carro, etc.); vii) escolher o sistema de processamento e registo dos dados; viii) discutir a forma de apresentação dos resultados; ix) solicitar autorizações para entrar em propriedades privadas; x) notificar as autoridades locais acerca da condução do inventário, para evitar problemas de suspeição da parte das pessoas inquiridas.

Depois de estar completa a fase de gabinete inicia-se o reconhecimento no terreno, verificando-se a validade de toda a informação recolhida, completando-a. Nesta fase é importante fazer uma observação directa das potenciais fontes e estabelecer contacto com algumas pessoas da área que possam ter conhecimento de dados que não são imediatamente reconhecíveis. Quando o projecto tem um prazo de execução mais alargado é comum fazerem-se questionários e averiguações pormenorizadas porta-a-porta.

Depois de finalizada esta etapa verifica-se toda a informação recolhida e elabora-se uma primeira classificação com ponderações acerca da influência de cada uma das fontes inventariadas.

A cartografia das fontes de contaminação das águas subterrâneas representa uma cartografia sintética que integra informações hidrogeológicas, devidamente explícitas para garantir a sua compreensão a todas as pessoas interessadas. Pretende fundamentalmente

informar acerca da distribuição da sensibilidade do território à potencial contaminação derivada das actividades humanas. Em termos sucintos, as utilidades mais significativas são as seguintes:

- Representa uma ajuda eficaz para os poderes públicos e agentes de intervenção na identificação dos riscos potenciais para as águas subterrâneas devido aos factores que considera.
- Reconhecimento das áreas susceptíveis de contaminação e das áreas adequadas para o desenvolvimento de actividades que acarretem riscos de contaminação, por possuírem poder auto-depurador do meio hidrogeológico.
- Pode contribuir para uma análise integrada junto de outras variáveis territoriais e ambientais.

Convém assinalar que neste tipo de documentos cartográficos a informação proporcionada tem um carácter meramente orientador e é fruto da integração de diversas variáveis, o que implica alguma perda de informação durante o processo de homogeneização. A questão fulcral na cartografia é definir o método da sua execução recorrendo-se actualmente aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

2.6 Hidrogeologia aplicada a sistemas termominerais

2.6.1. Considerações iniciais

Nas últimas três décadas tem havido um enorme crescimento de reconhecimentos hidrogeológicos nas áreas concedidas para exploração hidromineral. Estes estudos têm sido consequência da necessidade de captações profundas que substituam as emergências naturais.

As nascentes termominerais estão, frequentemente, relacionadas com sistemas hidrogeológicos condicionados pelas condições tectónicas e morfoestruturais. A presença de estruturas tectónicas (especialmente falhas, afectando zonas profundas da crosta) origina zonas de escoamento preferenciais, tais como fissuras, diaclases ou falhas (e.g., Ingebritsen & Sanford, 1998; Ingebritsen & Manning, 1999; Bitzer et al., 2001). Uma anomalia geométrica num maciço rochoso pode ter origem na distribuição de energia térmica devida à movimentação ascendente ou descendente de fluidos.

A localização das nascentes de águas minerais, na Península Ibérica, ao longo do traçado da falha regional de Régua-Verin constitui um indício importante de actividade neotectónica ao longo deste acidente maior no maciço Hespérico (e.g., Baptista et al., 1998; Calado, 2001, 2003). Deste modo, as ocorrências termominerais são controlados por estruturas geológicas profundas e activas, as quais induzem circulação de fluidos pela sua actividade sismotectónica

A actividade sísmica parece ser contínua ao longo do tempo, e concentrada nos locais onde ocorrem as emergências termominerais. A circulação de fluidos e as interacções fluido-rocha são componentes activas dos processos de ruptura sísmica, originando a fracturação hidráulica do maciço. As variações na tensão relacionadas com o ciclo de tensão sísmica controlam a manutenção e a circulação das águas termominerais nos segmentos activos de importantes estruturas geológicas.

As zonas intensamente fracturadas, correspondentes à intersecção destes tipos de estruturas, designadas habitualmente por nós tectónicos, são os locais mais propícios para a circulação, em regime forçado, dos fluidos termominerais (Ingebritsen & Manning, 1999; Bitzer et al., 2001). Assim, no caso de megaestruturas geológicas, os acidentes tectónicos podem, também, funcionar como estruturas-barreira, muitas vezes impermeáveis, que compartimentam o maciço, em blocos de forma aproximadamente rômica, favorecendo a circulação dos fluidos.

Para a diversidade e a grande variedade de características físico-químicas das águas termominerais contribui, certamente, o enquadramento tectónico dos diferentes ramos que constituem as megasestruturas regionais, tendo em conta os seguintes factores (Ingebritsen & Sanford, 1998):

- O gradiente geotérmico e/ou a temperatura a que os fluidos são submetidos;
- O tempo de contacto e de interacção fluido-rocha;
- A velocidade de circulação dos fluidos;
- A profundidade e as características do reservatório.

O estudo integrador da informação hidrogeológica, geomorfológica, geotectónica e geofísica permitirá, então, decidir da realização ou não de trabalhos adicionais de pesquisa directa. As singularidades geológicas ocorrentes em meios homogéneos determinarão condições para a circulação e armazenamento de águas subterrâneas. Em função do estudo de índole aplicada deve ser tentada a avaliação, qualitativa e quantitativa, do potencial das diversas estruturas hidrogeológicas.

2.6.2 Prospeção em maciços rochosos fissurados

Do ponto de vista da mecânica das rochas, designa-se por material rochoso (ou, simplesmente, rocha) o material entre as superfícies de compartimentação de um maciço rochoso, i.e., o material dos blocos, completamente separados ou não, que essas superfícies determinam (Rocha, 1981). Com efeito, o material rochoso não é contínuo, apresentando tanto descontinuidades planares macroscópicas (clivagens, fissuras, diaclases, etc.) como microscópicas. A anisotropia dos maciços rochosos provém, por um lado, da anisotropia da rocha e, por outro lado, das famílias de fracturas que intersectam os maciços. Esta última contribuição é, em regra, a mais relevante, não só no que respeita à deformabilidade mas também à ruptura dos maciços (Rocha, 1981; González de Vallejo et al., 2002).

Em estudos de cartografia geológico-geotécnica e hidrogeológica de maciços rochosos fracturados, a contribuição da geologia é de extrema importância nas várias fases de qualquer projecto de Engenharia. Com efeito, a habitual complexidade das unidades geológicas, no que se refere à diversidade dos tipos de litologias, à sua heterogeneidade e alteração, e ainda às

superfícies de descontinuidade (estruturas planares) que as intersectam, reflecte-se na estabilidade e permeabilidade de um dado maciço rochoso.

As ferramentas geológicas tradicionais (e.g., cartografia geológica, geologia estrutural e fotogeologia) quando aplicadas à prospecção geológica (ou, ainda, à prospecção hidrogeológica, geotécnica, geofísica e geoquímica), perspectivadas num quadro geológico regional actualizado, em que se valorizam os trabalhos à escala local baseados em critérios técnico-científicos, concretizam ferramentas de excelência, dentro dos seus limites de actuação e de competência em estudos de natureza aplicada.

Definido um modelo geológico e tectónico para uma dada região, o passo seguinte consiste no reconhecimento e posicionamento das estruturas hidrogeológicas que se suspeita condicionarem a circulação hídrica subterrânea. Reside aqui, aliás, a grande diferença, em termos de metodologia utilizada, entre a prospecção de rochas compactas fissuradas e de rochas com permeabilidade de interstícios. Na última, em geral, as estruturas condicionantes apresentam desenvolvimento espacial considerável, não sendo grande problema a sua detecção. Por outro lado, nas rochas compactas fissuradas, a zona de influência de estruturas hidrogeológicas favoráveis exibe, normalmente, dimensão muito reduzida, da ordem da dezena de metros ou menos, embora ocasionalmente possam atingir extensões de grandeza quilométrica. É este comportamento espacial particular das estruturas hidrogeológicas em rochas graníticas que obriga a que tanta ênfase seja dado à sua detecção.

De facto, definida a existência de uma determinada estrutura hidrogeológica, é muitas vezes recomendável o recurso a meios de prospecção geofísica (especialmente métodos geoelectrónicos, electromagnéticos e sísmicos) que permitam:

- Localizar com um máximo de precisão a estrutura procurada e definir a sua geometria em profundidade.
- Antecipar o comportamento hidrogeológico da estrutura e rochas encaixantes.
- Detectar, eventualmente, outras estruturas hidrogeológicas.

O comportamento hidrodinâmico da circulação hídrica subterrânea é tendencialmente do tipo não-confinado na zona superior passando a semi-confinado e confinado nas zonas intermédia

e inferior. As singularidades geológicas ocorrentes em meios homogêneos determinarão condições para a circulação e armazenamento de águas subterrâneas.

Desta forma, em estudos geológicos de índole aplicada deve ser tentada a avaliação, qualitativa e quantitativa, do potencial das diversas estruturas hidrogeológicas (figura 7).

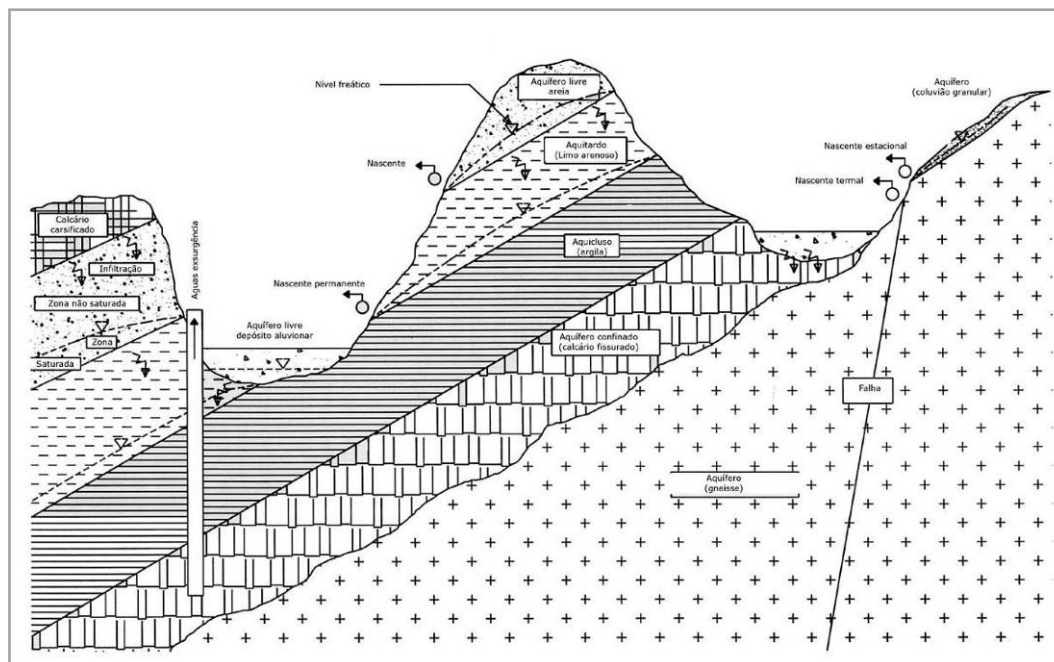


Figura 7 - Perfil esquemático de estruturas hidrogeológicas e tipos de formações aquíferos (adaptado de Rodríguez & Bedmar, 2003).

As principais estruturas hidrogeológicas são (Carvalho & Chaminé, 2004; Carvalho, 2006):

Falhas ou fracturas – são, porventura, as estruturas mais citadas na bibliografia sobre a prospecção hidrogeológica em rochas graníticas. As discontinuidades planares (falhas, fracturas *s.l.*) de um dado maciço rochoso em meios fissurados são vistas tradicionalmente como o veículo privilegiado para a circulação de águas subterrâneas e de fluidos hidrominerais.

Filões – ligadas estreitamente à tectónica, as estruturas filonianas, apresentam-se, geralmente, extremamente favoráveis. De destacar, sobretudo, o papel produtivo desempenhado pelos filões de quartzo ou filões aplíticos.

Contactos geológicos – são estruturas hidrogeológicas, em geral, muito negligenciadas, sendo paradoxalmente, das mais frequentes. O contraste de permeabilidade, a posição relativa quanto à direcção mais provável do fluxo subterrâneo, o grau de alteração ou tectonização e a atitude em profundidade têm de ser equacionados.

Zonas alteradas – o grau de alteração dos maciços é um importante factor condicionante da circulação de águas subterrâneas, especialmente em contextos graníticos, até porque está muitas vezes intimamente ligada à tectonização da rocha. Nem sempre as zonas mais alteradas correspondem a maiores produtividades. A experiência tem demonstrado que é imediatamente abaixo dos alteritos que são encontrados os caudais mais elevados.

O controlo tectónico sobrepõe-se, muitas vezes, claramente a todos os outros parâmetros (topografia, contactos litológicos, filões). Um outro importante aspecto a discriminar refere-se à análise cartográfica do padrão da fracturação, especialmente no estudo de áreas em que são evidentes nós tectónicos regionais susceptíveis de constituírem pólos de prospecção e pesquisa.

2.6.3 Energia Geotérmica: breves considerações

A geotermia poderá ser encarada como o conjunto das ciências e técnicas que estudam e exploram o calor terrestre. A energia geotérmica tem origem no interior da terra, verificando-se que, em termos médios, a temperatura aumenta, em profundidade, cerca de 33°C por km. Porém, devido à heterogeneidade da crosta terrestre, existem zonas anómalas do ponto de vista do gradiente geotérmico. O aproveitamento económico deste calor pode ser realizado na produção de energia eléctrica, para aquecimento do ambiente, de águas e em vários processos industriais.

A utilização ideal da energia geotérmica é em cascata, a temperaturas progressivamente mais baixas, até cerca dos 20°C. Este esquema de utilização foi desenvolvido por Lindal (1973), na sequência do primeiro choque petrolífero, estando representado no chamado *Diagrama de Lindal* (Figura 8).

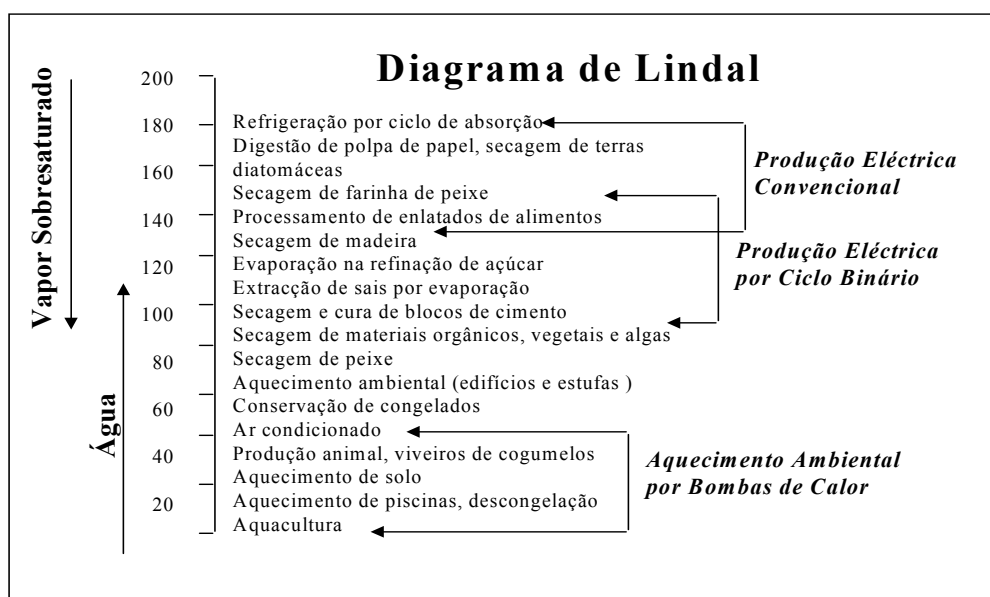


Figura 8 - Utilizações da energia geotérmica (adaptado de Lindal, 1973 e de Carvalho & Carvalho, 2004).

A balneoterapia, com longa tradição em Portugal, permanece como a utilização mais conhecida desta forma de energia. Mais modernamente, a geotermia tem alargado os seus domínios com a utilização de bombas de calor, no caso das utilizações directas, e com a utilização de centrais de ciclos binários, no caso da produção de energia eléctrica.

As tendências actuais da geotermia à escala mundial e em Portugal, numa perspectiva industrial, são seguidamente resumidas (Carvalho & Carvalho, 2004; Aires-Barros & Marques, 2000; Carvalho et al., 2005):

➤ Geotermia de alta entalpia

A geotermia de alta entalpia é a aplicação geotérmica com mais visibilidade e, porventura, mais importante em termos económicos. Trata-se da produção de electricidade a partir do vapor de água de origem geotérmica, em centrais com turbinas a vapor e unidade de condensação, assim como a partir do vapor e da água em centrais binárias. Os primeiros ensaios para produção de energia eléctrica remontam a 1904 e foram realizados em Larderello (Itália).

Actualmente, são produzidos 50 TWh_e (eléctricos) anuais, distribuídos por vinte e um países diferentes em quatro continentes, sendo a potência total instalada de 8 GW_e. Os Estados Unidos da América, que possuem o mais importante campo geotérmico do mundo nos “Geysers”, são o primeiro país produtor com 15 TWh_e anuais. Vêm de seguida as Filipinas, com mais de 9 TWh_e, e a Itália com 4,5 TWh_e. A produção mundial da energia geotérmica cresceu a um ritmo anual de 17%

durante os últimos cinco anos, principalmente nos países asiáticos. Prevê-se que no ano 2005 a potência total instalada seja de 11,4 GW_e correspondente a um crescimento de 43 %. Actualmente são produzidos, em sete países da Europa, 5,8 TWh_e por ano, sendo a potência total instalada de 1 GW_e.

Em Portugal, a exploração geotérmica de alta entalpia desenvolve-se na Ilha de S. Miguel (Açores), no Campo Geotérmico da Ribeira Grande, situado na vertente Norte do Maciço Vulcânico de Água de Pau/Fogo.

As duas centrais geotérmicas aí instaladas disponibilizam, anualmente, cerca de 105 GWh_e à rede eléctrica da ilha. Deste modo, contribuem, aproximadamente, com 40% da estrutura de produção eléctrica da ilha, o que representa cerca de 20% da produção do arquipélago. O Projecto Geotérmico foi já alargado à ilha Terceira onde estão a ser executados furos de avaliação/produção.

Nos últimos anos assistiu-se ao rápido crescimento da produção de electricidade a partir de fluidos geotérmicos de baixa entalpia, através de sistemas com centrais binárias. Contrariamente às centrais geotérmicas convencionais, onde as turbinas são accionadas directamente pelo vapor geotérmico, neste tipo de centrais as turbinas são accionadas pelo vapor de um fluido intermédio, com temperatura de vaporização inferior à da água. Este fluido é aquecido por permutação com as duas fases do fluido geotérmico. O uso do fluido intermédio permite uma maior rentabilidade do processo em aplicações na gama inferior de temperaturas do segmento de alta entalpia. Cerca de 50% das centrais geotérmicas instaladas no mundo utilizam já a tecnologia binária.

➤ Geotermia de baixa entalpia

Os aproveitamentos geotérmicos de baixa entalpia são muito antigos e conhecidos, sendo particularmente difundida a sua aplicação em balneoterapia. Esta forma de geotermia utiliza directamente o calor da terra presente nos fluidos, em diversas aplicações tais como: aquecimento de casas, de piscinas, de estufas e outras numerosas aplicações industriais, que são tipificadas no Diagrama de Lindal. Estas aplicações são mais difíceis de quantificar termicamente, excepto quando se trata de grandes redes de calor como é o caso, por exemplo, de algumas explorações na bacia de Paris (França) e em Ferrara (Itália).

Estima-se que a potência instalada no mundo, para aproveitamento da geotermia de baixa entalpia, alcance cerca de 17 GW_t, permitindo a produção anual de 54 TWh_t, em cinquenta e cinco países. Os principais países onde esta tecnologia é mais desenvolvida são os Estados Unidos

da América, a China e a Islândia. A potência instalada na Europa atinge cerca de 6 GW_t, permitindo a produção anual de 22 TWh_t em vinte e oito países (quadro 6).

Em Portugal funcionou de 1992 a 2002 o projecto geotérmico do Hospital da Força Aérea no Lumiar (quadro 7), com a potência de 0,6 MW_t, obtida a partir de um furo com 1500m de profundidade (temperatura de 50°C à cabeça da captação). Outros projectos menos voluntaristas estão, também, em funcionamento nas termas de Chaves, de Vizela e de S. Pedro do Sul (Portugal Norte e Central). A tecnologia actual permite que se produza electricidade a baixa temperatura, a partir de fluidos da ordem de 100°C, como os que se encontram em bacias sedimentares profundas ou em certas áreas de rochas cristalinas.

Quadro 6 - Energia disponível a partir de emergência com temperatura superior a 40º C.

Intervalo de temperaturas em (ºC)	N.º de ocorrências	Ktep/ ano		GWh/ ano	
		T-20ºC ⁽¹⁾	T-38ºC (2)	T-20ºC (1)	T-38ºC (2)
40- 49	8	2.8	-	3.5	-
50 - 59	1	0.4	0.02	0.52	0.24
> 60	4	8,2	6.1	10.1	7.7
Total	13	11.3	6.12	14.12	7.94

(1) Considerando um aproveitamento em cascata até 20º C.

(2) Considerando aproveitamento até 38º C.

Quadro 7 - Síntese dos principais aproveitamentos geotérmicos em Portugal Continental
(http://www.igm.ineti.pt/edicoes_online/boletim/vol37_2).

Temperatura de emergência (°C)	Tipo de recurso	Aproveitamento	
		Tipo	Situação
Caldas de Chaves			
73	Hidromineral e Geotérmico	Aquecimento das piscinas Climatização do hotel Águas quentes sanitárias Estufas	Em operação Em operação Em operação Em operação
S. Pedro do Sul			
69	Hidromineral e Geotérmico	Estufas do Pelo do Vau Climatização de hotéis Climatização do INATEL Piscicultura Estufas de flores	Em operação Em operação Em operação Em operação Em operação
Caldas de Vizela			
62	Hidromineral e Geotérmico	Climatização do hotel termal	Em operação
Hospital da Força Aérea			
50	Geotérmico	Climatização do hospital Águas quentes sanitárias	Em operação Em operação
Vouzela			
67	Geotérmico	Climatização Aquecimento de piscina	Em estudo
Serviços sociais das Forças Armadas – Oeiras			
30	Geotérmico	Climatização	Em estudo

2.7. Inventário hidrogeológico

O estudo das características hidrológicas de um sistema hidromineral deve passar pela elaboração do chamado inventário hidrogeológico (no sentido de inventariar pontos de água). Este método tem como base a recolha e análise de um conjunto de dados hidrológicos com origem, na sua maior parte, nos utilizadores dos pontos de água existentes (Custodio & Llamas, 2001).

O inventário hidrogeológico é um dos processos mais eficientes e mais económicos para a recolha de informações sobre as características hidrogeológicas de uma região, sem necessidade de recurso a meios de reconhecimento directo, furos de captação ou piezómetros. Para cada ponto de água é elaborada uma ficha, de que constam espaços destinados às informações de natureza hidrológica, técnica ou administrativas recolhidas. O inventário hidrogeológico pode revelar-se uma ferramenta indispensável para a gestão dos recursos hidrominerais, ao permitir determinar a distribuição espacial dos pontos de água, dos caudais extraídos e dos parâmetros hidráulicos dos aquíferos (coeficiente de armazenamento e transmissividade, em particular).

A recolha sistemática da informação sobre a geologia do subsolo, efectuada a partir dos relatórios de sondagens hidrogeológicas, pode tornar desnecessário o recurso à realização de novas sondagens de reconhecimento geológico, diminuindo os encargos económico-financeiros dos estudos. O mapa do inventário hidrogeológico pode, igualmente, ser útil para a caracterização estrutural de uma região permitindo, por exemplo, identificar locais favoráveis para a prospecção hidrogeológica através do alinhamento ou concentração de pontos de água.

A inventariação dos pontos de água constitui, assim, um importante elemento para a gestão dos recursos hidrominerais, desde o nível local ao nível nacional ou internacional, se este for efectuado de forma sistemática, técnica cientificamente fiável e com a preocupação de permitir a articulação de dados entre diferentes bacias hidrogeológicas e hidrográficas.

2.8. Cartografia hidrogeológica

O mapa hidrogeológico é um documento de grande utilidade em qualquer estudo de hidrogeologia. Este documento cartográfico pode conter informação mais ou menos complexa e densa, consoante o fim a que se destina. Custódio & Llamas (2001) definem mapa hidrogeológico como sendo uma representação gráfica de uma série de fenómenos ou características das águas subterrâneas, em que os fenómenos podem ser de carácter permanente (geologia, obras hidráulicas, pontos de água, etc.) ou podem ser dinâmicos (altura ou profundidade do nível

hidroestático, caudais extraídos, dados de hidroquímica, etc.) pelo que devem ser perfeitamente localizados no tempo. Assim sendo, há que referir os seguintes componentes dos mapas hidrogeológicos:

- **dados climáticos:** dados referentes à precipitação e evapotranspiração, sob forma de valores pontuais ou de isolinhas;
- **dados geológicos:** a natureza e o pormenor dos dados geológicos a incluir deve ser tal que não prejudique a leitura e a correcta interpretação do mapa hidrogeológico, adequando-se à escala. As unidades geológicas presentes, as suas características tectónicas e hidrogeológicas são os dados mais frequentemente incluídos. No caso dos sistemas hidrominerais em rochas cristalinas importa dar especial atenção à disposição espacial das fracturas. A informação hidrogeológica relacionada com os materiais rochosos refere-se sobretudo à porosidade e ao tipo de meio (fracturado ou poroso);
- **hidrologia superficial:** devem figurar no mapa as linhas de água, o seu tipo (permanente, sazonal ou temporário), a separação das bacias hidrográficas, lagos, obras hidráulicas (canais, barragens), caudais de escoamento superficial, de rega e de transferência entre bacias, localização de estações limnigráficas, zonas húmidas, etc;
- **hidrologia subterrânea:** devem ser indicados os pontos de água através de sinalética adequada, as linhas isopiezas, a direcção do escoamento, etc. No caso dos meios fracturados, há que indicar o papel das fracturas representadas no escoamento subterrâneo (condutas preferenciais, barreiras, papel desconhecido, ou outro);
- **dados hidroquímicos:** estes dados prestam-se igualmente à representação pontual ou por isolinhas de concentração. São especialmente úteis em estudos sobre a poluição das águas subterrâneas. Além dos dados a incluir no mapa hidrogeológico, é frequente a elaboração de mapas hidroquímicos auxiliares, tais como diagramas de Stiff, de colunas, ou outros gráficos.

Aos sistemas hidrominerais que são de circulação profunda, estão geralmente associados sistemas hidrogeológicos de circulação mais superficial. Este facto pode complicar a elaboração de mapas hidrogeológicos de tal forma que torne vantajosa a criação de dois, ou mais, mapas sobreponíveis, cada um deles representando um aquífero.

A mesma regra é aplicável sempre que a densidade de informação disponível prejudique a leitura e a interpretação do mapa. Nestes casos, é de considerar a criação de um mapa hidrogeológico com informação geral, acompanhado de um conjunto de mapas auxiliares com

informação mais específica (mapas de isopiezas, mapas hidroquímicos, mapas de vulnerabilidade à contaminação, entre outros). A figura 9 apresenta um exemplo de uma carta hidrogeológica.

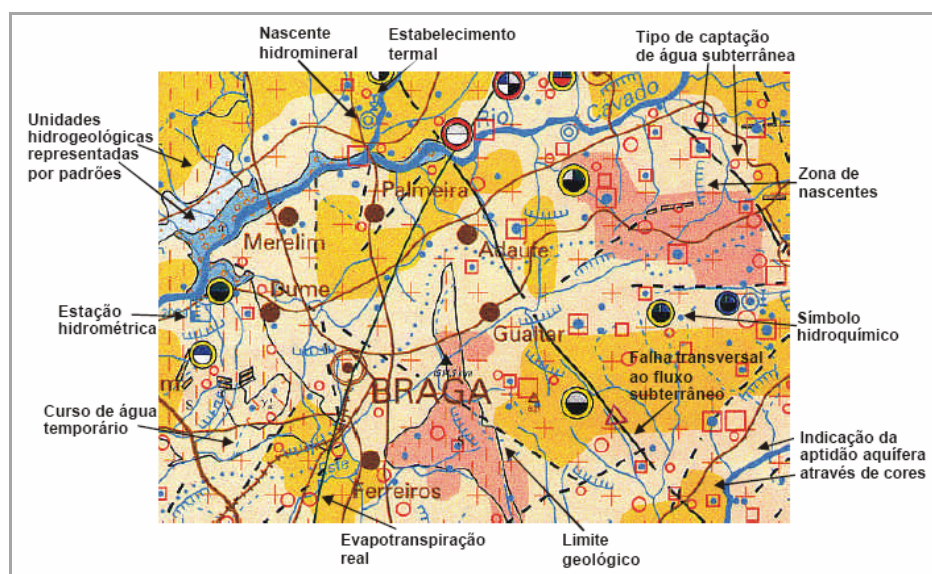


Figura 9 - Extracto da carta hidrogeológica de Portugal (Pedrosa, 1999; Pedrosa et al., 2000).

3

**GEOFÍSICA APLICADA À HIDROGEOLOGIA:
OS MÉTODOS ELECTROMAGNÉTICOS**

3. GEOFÍSICA APLICADA À HIDROGEOLOGIA: OS MÉTODOS ELECTROMAGNÉTICOS

3.1. Introdução

Desde finais da segunda Guerra Mundial que a investigação geofísica aplicada teve uma forte expressão dirigida ao aperfeiçoamento das técnicas ligadas, especialmente, à pesquisa de petróleo e de minerais metálicos, sendo utilizada tradicionalmente com sucesso como técnica não complexa de investigação do subsolo.

A geofísica é um conjunto de técnicas que se aplica para investigar o interior da Terra, a partir das quais se avaliam as variações detectadas, em parâmetros físicos significativos e a sua correlação com as características geológicas. Estas técnicas caracterizam-se por serem não destrutivas e com uma grande cobertura de investigação, complementando os ensaios geotécnicos “in situ”. Os dados obtidos dos estudos geofísicos para serem eficazes dependem da qualidade dos mesmos e do modo como são interpretados.

A prospecção geofísica têm como objectivo principal, contribuir para o conhecimento da terra, investigando estruturas superficiais e profundas, compreende assim, vários métodos que visam definir indirectamente a geometria das formações geológicas no subsolo, podendo dividir-se em três grandes grupos: i) sísmicos; ii) gravimétricos; iii) eléctricos e electromagnéticos.

Com as técnicas de prospecção geofísica pretende-se medir determinadas propriedades físicas da crosta terrestre, com o intuito de caracterizar a intensidade e a distribuição espacial de anomalias nos valores medidos para essas propriedades e, assim, efectuar a sua interpretação geológica. A resposta geofísica de uma estrutura geológica pode ser diferente para diversos métodos e a capacidade de um determinado método em identificar uma estrutura, bem como do contraste entre o tipo de estrutura alvo e o meio geológico onde se encontra.

Desde os finais da década de setenta, do século XX, que os métodos geofísicos têm sido utilizados no âmbito de problemas ambientais, contaminações, localização de objectos soterrados, monitorização e exploração de recursos geológicos (Rodríguez & Bedmar, 2003).

A contribuição da geofísica é analisada e justificada, quer no apoio do estudo das condições geológicas locais quer na planificação de sondagens de pesquisa. Fica, assim, demonstrado que a geofísica aplicada proporciona um conjunto de técnicas expeditas, não complexas, económicas, embora indirectas, de grande interesse na resolução de problemas ambientais e dos georrecursos.

Concretamente, o método electromagnético teve um grande desenvolvimento na aplicação em hidrogeologia. A sua utilização em hidrogeologia foi influenciada pela constatação da sua utilidade na prospecção de um outro fluido, o petróleo.

Existe uma grande variedade de métodos electromagnéticos, mas todos de corrente eléctrica alternada induzindo um campo magnético. Através desse campo magnético é possível localizar o corpo condutor. Na maior parte dos casos, os níveis aquíferos apresentam maior condutividade eléctrica, de onde resultam variações em relação aos campos magnéticos induzidos nos níveis não aquíferos. Estes métodos fazem o uso da resposta do solo à propagação de ondas electromagnéticas. Os campos electromagnéticos primários podem ser gerados pela passagem de uma corrente alterna numa bobine. A resposta do solo a esse estímulo é a geração de correntes induzidas, que são alternadas, as quais por sua vez geram campos magnéticos, que induzem correntes na bobine de recepção.

Ainda que o fluxo da corrente eléctrica e o escoamento da água subterrânea sejam regidos por leis físicas diferentes, têm sido estabelecidas analogias entre elas. Há relações empíricas estabelecidas (Nunes, 2005), lineares ou logarítmicas, entre a condutividade hidráulica (k) e a resistividade eléctrica aparente dos materiais constituintes dos aquíferos (ρ_a) ou entre a transmissividade (T) e a resistência transversal (R). Estas relações têm como fundamento a relação entre a lei de Darcy e a lei de Ohm.

A aplicação destes métodos permite, igualmente, determinar alterações na condutividade eléctrica dos materiais geológicos motivadas pela presença de plumas de contaminação ou intrusões salinas. Permitem, ainda, a determinação indirecta da natureza dos materiais geológicos sub-superficiais, e efectuar uma abordagem inicial às regiões de interesse geo-industrial.

Os resultados da aplicação destes métodos são auxiliares preciosos para a programação de acções subsequentes destinadas à observação geológica directa, regra geral mais dispendiosas, onde se destaca a execução de sondagens (Nunes, 2005).

Com efeito, os estudos geofísicos permitem racionalizar a execução de campanhas de sondagens de prospecção hidrogeológica, em muitos casos, quando os meios financeiros são escassos e é desejável que as sondagens de prospecção sejam simultaneamente as de exploração do recurso hidrogeológico (Cruz, 2002; Rodríguez & Bedmar, 2003).

Qualquer um dos métodos geofísicos a seguir descritos é passível de ser utilizado no estudo de sistemas hidrominerais (quadro 8).

Quadro 8 - Síntese dos principais métodos geofísicos e suas aplicações
[1: nT, nanoTesla; 2: mGal, miliGal (=1 cm s⁻²).

Métodos geofísicos e sua aplicação				
Métodos	Grandeza medida	Unidade	Aparelho utilizado	Campo de aplicação
Eléctricos	Resistividade eléctrica	$\Omega.m$	Resistímetro	Medição de resistividade dos solos
Refracção sísmica	Velocidade de propagação	m/s	Geofone/hidrofone	Medição de espessuras de recobrimento de uma estrutura; ripabilidade dos materiais; volumes
Reflexão sísmica	Velocidade de propagação	m/s	Geofone/hidrofone	Definição de estruturas geológicas profundas (utilizam-se em obras subterrâneas; por ex: túneis, investigação de deslizamentos profundos)
Gravimétricos	Campo gravítico	(mGal) ²	Gravímetro	Localização de galerias, etc.
Magnéticos	Campo magnético terrestre	(nT)	Magnetómetro	Utilizados para localizar contactos litológicos; falhas; diques, etc., utilidade limitada.
Electromagnéticos	Resistividade eléctrica	$\Omega.m$	Resistímetro	Interpretação geológica e variações estratigráficas.
	<i>In-phase, Out-phase</i>	-	Bobine eixo horizontal, Bobine eixo vertical	Localização de fracturas com circulação de água; mapeamento de cursos de água subterrâneos.

As águas minerais são muitas vezes caracterizadas por temperaturas e mineralizações mais elevadas em relação às águas normais existentes nos mesmos locais. Assim, os métodos geofísicos especialmente indicados para a hidrogeologia são os métodos electromagnéticos, os eléctricos e as diagrfias térmicas e eléctricas.

A geofísica presta auxílio na resolução de diversos problemas frequentemente colocados nos estudos hidrogeológicos, tais como (Rodríguez & Bedmar, 2003):

- Determinar a espessura da camada superficial de materiais não consolidados.
- Determinação da espessura da zona não saturada.

- Localização de fracturas com circulação de água.
- Estimar a forma tridimensional dos aquíferos.
- Avaliação da porosidade e das reservas dos aquíferos.
- Avaliação da velocidade de circulação subterrânea.
- Mapeamento de cursos de água subterrâneos.
- Localização de nascentes termais.

Os métodos geofísicos ainda não permitem actualmente obter resultados tão precisos como seria desejado. No sentido de aumentar o sucesso da sua aplicação, estes métodos devem ter como base um conhecimento das condições geológicas tão profundo quanto possível. Apenas, com um enquadramento geológico adequado é possível produzir resultados fiáveis, os quais, por sua vez, poderão contribuir para a evolução do próprio conhecimento da geologia da região. Por essa razão, a colaboração estreita entre os técnicos de geociências e os geofísicos é imprescindível para aumentar a eficácia dos estudos geofísicos aplicados. O diálogo entre estas duas especialidades deverá compatibilizar a abordagem mais físico-naturalista, do hidrogeólogo, com a abordagem mais físico-matemática, do geofísico.

Os métodos anteriormente referidos têm sido utilizados para selecção dos locais para sondagens, para a determinação da geometria de aquíferos, para as áreas de vulnerabilidade e para plumas de contaminação. Na maioria dos casos a investigação geofísica permite apenas detectar as zonas aquíferas mais prováveis, pois necessita de ser complementada com informação sobre o contexto geotectónico, a hidrodinâmica e a heterogeneidade das formações aquíferas.

O método electromagnético subdivide-se em dois grandes grupos, a saber (Rodríguez & Bedmar, 2003): um primeiro grupo utiliza como fonte primária as ondas electromagnéticas do campo electromagnético terrestre ou as perturbações provocadas nesse campo por causas naturais; um segundo grupo que utiliza ondas artificiais, geradas quer por uma fonte fixa (antena emissora de ondas de muito baixa frequência a baixa frequência) quer por fonte móvel.

3.2. Fundamentos teóricos

Existem muitas técnicas de prospecção geoelectrica nas quais, o campo magnético variável no tempo é usado como fonte (Keller & Frischknecht, 1982). Estes métodos são usualmente referidos como métodos electromagnéticos, mas cujo termo mais apropriado são métodos indutivos, de modo a distinguirem-se dos outros métodos geoelectricos que também usam o campo electromagnético (como o método magnético telúrico e o método geo-radar). As

frequências usadas no método indutivo são geralmente mais altas do que as usadas no método telúrico mas mais baixas do que as frequências usadas no método de geo-radar. Usualmente os métodos indutivos empregam frequências da ordem dos 100 a 5000 Hz.

Um campo magnético variável no tempo, também chamado campo primário H_p , pode ser criado pela passagem de corrente eléctrica alternada através de uma bobine de fio condutor, bobine transmissora Tx (figura 10). Se estiver presente algum material condutor, este campo magnético induz correntes (ou "eddy currents") que circulam em anéis fechados, numa trajectória normal ao campo magnético. Estas, por sua vez, geram por indução um campo magnético secundário, H_s . A resultante do campo magnético é normalmente medida em termos de voltagem induzida na bobine receptora, Rx.

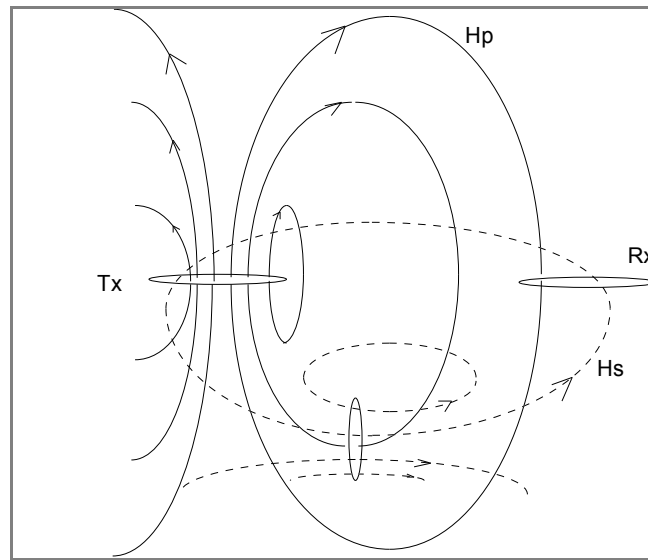


Figura 10 - O campo primário H_p é gerado pelo fluxo de corrente na bobine Tx (adaptado de Keller&Frischknecht, 1982).

Este campo gera corrente na bobine pequena, que representa um corpo condutor. Esta corrente cria o campo secundário, H_s . Ambos os campos são medidos na bobine Rx (Keller & Frischknecht, 1982).

O campo magnético secundário é função da distância entre bobines, S , da frequência de operação e da condutividade do terreno σ . Esta função simplifica-se para determinados valores de S e ω (McNeill, 1980a) e então toma seguinte forma:

$$\frac{H_s}{H_p} = \frac{i\omega\mu_0\sigma S^2}{4} \quad [1]$$

onde:

H_s – campo magnético secundário na bobine receptor

H_p – campo magnético primário na bobine receptor

ω = 2πf

f - frequência (Hz)

μ₀ - permeabilidade do vazio (m/s)

σ - condutividade do terreno (mho/m)

S – espaçamento (m)

i = $\sqrt{-1}$

O quociente entre os campos magnéticos secundário e primário, é directamente proporcional à condutividade do terreno, pelo que se o equipamento medir aquela razão, a condutividade é dada por:

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega \mu_0 S^2} (H_s/H_p) \quad [2]$$

A unidade S.I. da condutividade é ohm/m (*Siemens*) ou μS/m (*micro-Siemens* por metro).

O campo secundário pode ser comparado em magnitude e em fase com o campo primário (que prevalece na ausência de zonas condutoras), podendo nestes casos ser facilmente detectado pelo receptor.

A distribuição das "*correntes parasitas*" no interior de um corpo depende, não só das frequências, mas também do tamanho, forma e condutividade do corpo. Para frequências baixas, as "*correntes parasitas*" circulam em profundidade no interior do condutor. Para altas-frequências, o "*skin effect*" (num condutor eléctrico, devido às características do meio, à medida que a frequência aumenta, a corrente eléctrica começa a fluir cada vez mais afastada do centro físico do condutor) confina a circulação da corrente, principalmente na vizinhança, perto da superfície do corpo.

Para altas-frequências, o campo primário é muitas vezes anulado pelo campo secundário, devido às correntes na superfície do corpo condutor, por isso o campo no interior do corpo é perto de zero. Esta condição, muitas vezes refere-se à saturação das "*correntes parasitas*", o campo secundário anómalo detectado na bobine receptora não pode ser aumentado pelo posterior aumento da frequência.

O campo electromagnético depende da permeabilidade magnética dos materiais rochosos, assim como da condutividade. Geralmente os vários efeitos que podem ser atribuídos pela variação da permeabilidade magnética são pequenos quando comparados com os efeitos

causados pela variação da condutividade. Contudo, as distorções do campo magnético, causadas por valores anormalmente grandes de permeabilidade magnética são muitas vezes observadas sobre rochas altamente magnéticas (Keller & Frischknecht, 1982).

3.3. Procedimentos de Campo

3.3.1. Equipamento

Neste trabalho as medições electromagnéticas foram efectuadas com o aparelho "*Geonics EM34 Ground Conductivity Meter*". O EM34 é um aparelho portátil, que necessita, pelo menos, de dois operadores, sendo constituído por duas bobines ligadas entre si, por um cabo de referência, um receptor e um transmissor e cabos de ligação (que efectuem a ligação entre o receptor e o transmissor com as respectivas bobines). A fonte de energia é fornecida por duas baterias recarregáveis, uma acoplada ao transmissor e outra ao receptor (figura 11).



Figura 11 – Exemplo do equipamento "Geonics EM34 Ground Conductivity Meter".

Para um terreno homogéneo (ou horizontalmente estratificado), o fluxo de corrente gerado pelo aparelho EM34, é considerado como sendo totalmente horizontal. Tendo em conta as condições e princípios que estiveram na base de concepção do equipamento, o fluxo de corrente num dado ponto é independente do fluxo em qualquer outro ponto, sendo a profundidade de investigação limitada, apenas pelo espaçamento entre bobines e sua disposição geométrica, ou seja consoante se utilize o dipolo vertical ou dipolo horizontal. No quadro 9 encontram-se representadas as profundidades de investigação, para cada tipo de espaçamento e disposição. A

cada espaçamento correspondem as seguintes frequências de operação 6.4 KHz, 1.6KHz e 0.4 KHz (figura 12).

Quadro 9 - Profundidade de investigação do EM34-3 para as diferentes configurações possíveis (adaptado de Ogilvy et al., 1991).

Espaçamento entre bobines (metros)	Profundidade de exploração (metros)	
	Dipolos horizontais	Dipolos verticais
10	5,9	12,6
20	11,8	25,3
40	23,5	50,6

Este equipamento pode ser operado com as configurações dipolo vertical e/ou horizontal (bobines horizontal e/ou vertical, respectivamente), dando, cada um destes modos, uma resposta significativamente diferente com a profundidade.

No modo dipolo vertical, a resposta instrumental relativa é zero perto de materiais superficiais aumentando com a profundidade, tornando-se máxima para uma profundidade 0.4 vezes o espaçamento entre bobines e decresce lentamente com o aumento da profundidade. No caso do modo dipolo horizontal, a resposta é máxima perto de materiais superficiais, decrescendo uniformemente com a profundidade. Medições em ambos os modos, permitem determinar onde a condutividade aumenta ou diminui com a profundidade.

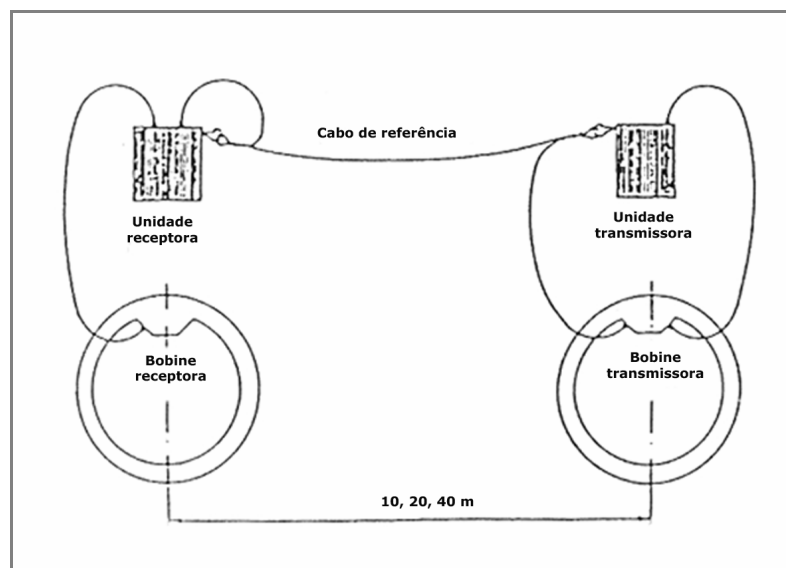


Figura 12 - Desenho esquemático do EM34-3 (adaptado de McNeill, 1980a).

3.3.2. Erros de Medição

Existem alguns aspectos importantes no planeamento e execução do estudo, em particular os "ruídos", os quais, se não forem levados em consideração, podem induzir em interpretações erróneas e, conseqüentemente, ao falseamento dos objectivos pretendidos. Existem vários "ruídos" que provocam erros nas medições, tais como (Keller & Frischknecht, 1982):

- a) Ruídos produzidos pela actividade humana (linhas de alta tensão, instalações industriais, veículos automóveis, etc.) e os devidos a campos naturais, cujas trovoadas são um bom exemplo. A intensidade destes ruídos varia muito de uma zona para outra e depende também da hora a que se realizam as medições.
- b) Ruído operacional - nesta denominação incluem-se certas imprecisões na medição, que fazem com que esta não seja realizada exactamente nas condições previstas, assim como os usuais erros de apreciação por parte do operador. Figurarão entre os ruídos deste tipo os erros na separação e orientação das bobines.
- c) Com o modo dipolo horizontal, a medição é relativamente insensível à orientação da bobine. Neste modo, o campo magnético secundário é perpendicular ao plano da bobine receptor e um erro pequeno, θ , o mau alinhamento das bobines, produz um erro $\cos\theta$, na condutividade aparente. Quando se usa, contudo, o modo dipolo vertical, o campo magnético secundário é aproximadamente 45° com a horizontal e pontos longe do

transmissor. Neste caso, um pequeno erro de mau alinhamento entre bobines, causa um erro da ordem de $\cos(\theta+45^\circ)$, resultante da grande sensibilidade do mau alinhamento. Em ambos os modos de operação devem-se manter as duas bobines o mais coplanares possíveis. As pequenas variações na distância entre bobines não têm grande repercussão nos valores de leitura de condutividade eléctrica. O tamanho dos erros deste tipo depende em grande parte da topografia e vegetação, que influenciam na visibilidade entre o emissor e receptor.

d) Ruído geológico - consiste nas anomalias produzidas por heterogeneidades do subsolo sem importância para a finalidade da investigação; tais heterogeneidades são condutoras e entre elas figuram variações no recobrimento, zonas húmidas ou pantanosas, etc.

Em resumo, as condições de medição de zonas anómalas não só dependem das suas características e do método empregue, mas também do instrumento e técnica operativa, assim como das circunstâncias topográficas e geológicas.

3.3.3. Recolha dos dados de campo

Antes de se efectuar o trabalho de campo deve-se fazer um reconhecimento prévio da zona, de modo a obter-se um melhor conhecimento da região, em particular no que diz respeito às vias de acesso, assim como verificar se a zona de estudo é uma área livre de ruídos relacionados com causas artificiais, caso das linhas de alta tensão, linhas de caminho de ferro, etc.

Neste trabalho foram efectuados uma série de perfis, com direcção aproximada NNW-SSE. Depois de escolhidos os locais onde se iriam efectuar os perfis, iniciaram-se os trabalhos de campo com espaçamento entre bobines de 10, 20 e 40 m e leituras 5 em 5 m. As medições foram efectuadas com os modos dipolos verticais e horizontais.

O operador transmissor e o receptor deslocam-se simultaneamente, mantendo fixa a sua separação, e sobre o mesmo perfil. O espaçamento entre bobines é medido electronicamente, de modo a que o operador receptor apenas efectue pequenas correcções, aproximando-se ou afastando-se do transmissor até que um indicador de aferição indique que se está no espaçamento correcto, altura em que num outro mostrador se pode ler a condutividade do ponto de registo, o qual é identificado, pelo local onde se encontra a bobine transmissora. O procedimento da leitura demora 10 a 20 segundos. Durante toda a medição deve-se ter cuidado com a coplanaridade entre bobines, tendo-se uma especial atenção com o modo dipolo vertical.

Um pormenor importante a ter em conta quando se faz uma medição, é a orientação dos dipolos magnéticos, pelo que em ambas as bobinas existe uma marca vermelha que se orienta no mesmo sentido em cada estação de medição. Não esquecendo este procedimento simples, garante-se que o dipolo transmissor está orientado no mesmo sentido do dipolo receptor; caso este procedimento não se efectue, é simplesmente impossível obter qualquer leitura da condutividade.

3.4. Potencialidades e limitações do método indutivo

As principais vantagens do método indutivo são as seguintes:

a) Excelente resolução de condutividade. Um problema dos métodos convencionais de resistividade é que a presença de heterogeneidades resistivas localizadas perto dos eléctrodos de potencial causam grandes erros. Se examinarmos o fluxo de corrente num semi-espaco homogéneo pelas técnicas indutivas, verifica-se que na vizinhança do transmissor a densidade de corrente é muito elevada, podendo-se esperar que a presença de uma heterogeneidade condutora aqui localizada, tenha um grande efeito. Contudo, aqui a densidade de corrente é elevada, o raio de fuga da corrente é pequeno e a sua distância à bobina receptora é pequena, por isso essas fugas não interferem magneticamente com o receptor. O efeito de mudar esta corrente variando a condutividade local é então desprezável. A extensão lateral do volume do terreno cuja condutividade é detectada pela técnica indutiva é aproximadamente a mesma que a profundidade lateral. Desta forma, são facilmente medidas e com precisão pequenas mudanças de condutividade, por exemplo da ordem dos 5 ou 10%.

b) Não existem problemas de injeção de corrente. Como as correntes são induzidas magneticamente no terreno, problemas de injeção de corrente verificadas nos métodos de resistividade, em matérias tais como cascalho, substrato, solos gelados, neve e gelo, não se verificam com este tipo de instrumentos.

c) Cálculos simples para duas camadas.

d) Medições rápidas e fáceis. O problema com o método de resistividade usando o dispositivo de Wenner, para se conseguir uma profundidade de investigação a necessita de um comprimento do dispositivo $3a$ e o comprimento total do cabo eléctrico tem que ser $4a$

usado em 4 secções. Existem muitas ocasiões em que o cabo eléctrico parte e, além disso, cada medição requer a inserção de 4 eléctrodos no terreno e algum cuidado na medida do espaçamento entre os eléctrodos. Estas características são evitadas com o método electromagnético e não é exagerado dizer-se que este método de prospecção demora 5 a 10 minutos. Com o EM34 é possível prospectar 5 a 7 km por dia com o espaçamento entre as estações de 25 ou 50m.

As principais desvantagens do método indutivo são as seguintes:

a) Espaço dinâmico limitado (1- 1000 ohms/m). Para baixos valores da condutividade do terreno torna-se difícil induzir magneticamente corrente suficiente no terreno para produzir um campo magnético que seja detectável na bobine receptor. Pelo contrário, para valores altos de condutividade, a componente da quadratura do campo magnético recebido não é proporcionalmente linear à condutividade do terreno.

b) Ajuste e manutenção do zero instrumental. Idealmente o ajuste do zero do aparelho seria no vazio. A alternativa mais aceitável é procurar uma região onde o terreno seja muito resistivo, para que a medida seja precisa, sendo usada a técnica convencional de condutividade, para o qual sendo aparelho é ajustado no local. Este é o procedimento que actualmente se usa. É necessário que o zero seja mantido com precisão em longos períodos de tempo durante uma campanha de prospecção geofísica e que não haja variações de temperatura. Estas produzem pequenos contrastes no circuito, como resultado, o zero pode ter um erro de $\pm 0,2$ ohms/m. O erro torna-se significativo em terrenos altamente resistivos.

Capacidade limitada em sondagens verticais. Em teoria é possível usar o sistema tal como o EM34 para espaçamentos contínuos de modo a obter-se maior informação acerca da estratificação eléctrica do terreno. Existe contudo um rápido decaimento do campo electromagnético a partir do dipolo transmissor introduzindo uma série de problemas na escolha da banda electromagnético a utilizar.

4

AVALIAÇÃO ECOTOXICOLÓGICA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

4. AVALIAÇÃO ECOTOXICOLÓGICA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

4.1. Considerações gerais

A Ecotoxicologia é considerada a ciência que estuda os efeitos tóxicos de agentes químicos e físicos nos organismos vivos, em particular nas populações e comunidades no seio de ecossistemas definidos, incluindo as vias de entrada e transporte dos agentes em causa e a sua interacção com o ambiente (Walker et al., 2001; Newman & Unger, 2002). Esta é uma ciência multidisciplinar que integra conhecimentos de Ecologia, Química e Toxicologia, com o objectivo de avaliar efeitos ecologicamente relevantes que possam ocorrer a qualquer nível de organização biológica. O termo ‘ecotoxicologia’ foi introduzido por Truhaut em 1969, e deriva das palavras ‘ecologia’ e ‘toxicologia’. A sua introdução é consequência da preocupação crescente sobre os efeitos dos contaminantes ambientais noutras espécies de organismos que não a humana e desenvolveu-se sobretudo devido ao problema da persistência dos pesticidas organoclorados no ambiente levantado pela publicação, em 1962, do livro “Silent Spring” por Rachel Carson, que chama a atenção para os riscos da poluição por agentes químicos, particularmente por pesticidas (Rand et al., 1995).

Neste contexto é importante distinguir os termos ‘contaminante’ e ‘poluente’. Um poluente é considerado um agente físico ou uma substância química que se acumula num determinado ambiente, em níveis estimados como superiores aos que ocorreriam naturalmente, e que tem um efeito prejudicial para os organismos vivos (Walker et al., 2001). Por sua vez, um contaminante é substância química geralmente resultante da actividade humana, que se acumula no ambiente em níveis elevados, mas que não tem necessariamente efeitos biológicos.

Os tipos de poluição a que os sistemas de água doce são expostos são muitos e de natureza variada (Cooney, 1995), nomeadamente física (*e.g.*, temperatura, radioactividade, partículas em suspensão), química (*e.g.*, pH, oxigénio dissolvido, metais, detergentes, pesticidas) e biológica (*e.g.*, matéria orgânica, microorganismos) (Walker et al., 2001; Klaassen & Watkins, 2001).

A actividade humana pode levar à entrada de poluentes nos ecossistemas aquáticos dulciaquícolas por vias distintas que incluem entre outras (Walker et al., 2001): a libertação de lixos e dejectos domésticos e efluentes industriais não tratados; a aplicação de fertilizantes, pesticidas, insecticidas e fungicidas vários nos solos para controlo de pragas e dos seus vectores de transmissão; a descarga de águas residuais domésticas e industriais. Em especial, o tratamento dos solos com fertilizantes, e pesticidas afecta directamente os próprios solos, mas dá também

origem à poluição de águas superficiais e subterrâneas, na medida em que o solo é o local de escorrência e passagem da água infiltrada da precipitação. De facto, o lixiviado produzido pelas águas pluviais arrasta todas estas substâncias nocivas para os aquíferos. A água subterrânea pode ainda ser afectada por outras actividades humanas como a captação de água e intervenções no ciclo hidrológico decorrentes da impermeabilização e compactação de solos. A contaminação atmosférica pode também influenciar a contaminação de ecossistemas aquáticos, uma vez que as águas pluviais podem arrastar partículas sólidas existentes na atmosfera para os solos e as águas superficiais, e em última instância para os aquíferos (Walker et al., 2001; Martí, 2002).

4.2. Avaliação ecotoxicológica de água subterrânea

Como foi já referido, as águas de aquíferos subterrâneos constituem uma das principais fontes de abastecimento de água para uso doméstico, agrícola e industrial. Contudo, ao longo dos anos, as águas subterrâneas associadas a aglomerados urbanos, são susceptíveis de se tornarem contaminadas por compostos decorrentes das actividades humanas que ocorrem nos terrenos à superfície (Das Gupta, 1996). A libertação continuada de efluentes, originados pelo armazenamento de gás e petróleo, por indústrias de metais, têxteis e curtumes, por exemplo, pela utilização de fertilizantes e pesticidas agrícolas, e as próprias águas residuais domésticas, que entram no ciclo hidrológico acabam por contaminar os aquíferos, através de mecanismos de convexão, dispersão mecânica, e/ou difusão molecular, diminuindo a qualidade da água (Das Gupta, 1996). Para além disso, como as cidades se formaram preferencialmente à volta de rios, em muitas áreas urbanas verifica-se que as águas subterrâneas estão muitas vezes em continuidade hidráulica com rios locais e áreas de águas superficiais. Em resultado, as águas subterrâneas sofrem impacto apresentando-se contaminadas por uma vasta gama de compostos tóxicos provenientes de actividades urbanas, industriais, agrícolas, que formam misturas complexas.

A acrescentar a estes aspectos, a pressão cada vez maior criada pelos problemas de falta de água e de necessidade de uma gestão mais adequada dos gastos e usos dados à água, bem como a importância do papel das águas subterrâneas na recarga das águas superficiais tornaram a avaliação da qualidade dos aquíferos numa prioridade. Para esta situação muito veio também contribuir a introdução da Directiva Quadro da Água, quer a nível europeu (Directiva nº 2000/60/CE) quer nacional (Lei nº 58/2005).

Tradicionalmente a avaliação do estado das águas subterrâneas baseia-se sobretudo na aplicação de métodos de química analítica que visam a detecção e quantificação de compostos

presentes em amostras destas águas (Mendes & Oliveira, 2004). A presença de um dado composto químico numa determinada área e em concentrações superiores aos limites definidos na legislação permite então classificá-la como podendo eventualmente causar efeitos ambientais adversos. Os limites legais foram, regra geral, obtidos a partir de ensaios de toxicidade que medem o impacto de um único composto químico em organismos teste, em condições laboratoriais, realizados com o objectivo de relacionar as concentrações químicas deste composto com possíveis impactos biológicos.

Contudo, atendendo a que as águas subterrâneas contaminadas correspondem, regra geral, a misturas complexas de compostos químicos, estes métodos apresentam vários problemas. Por um lado, a avaliação através de análises químicas requer o conhecimento prévio da utilização do local e dos eventuais químicos utilizados e potencialmente libertados para o ambiente, informação que pode ser de difícil obtenção. Por outro lado, os resultados das análises químicas podem ser difíceis de extrapolar para uma avaliação dos efeitos adversos provocados por estas águas, pois a toxicidade de misturas complexas pode ser complicada por interações que ocorrem entre as diferentes espécies químicas em solução e por efeitos cumulativos nos organismos (Walker et al., 2001). Efectivamente, numa mistura complexa de compostos químicos, a interação entre as diferentes espécies químicas pode originar efeitos tóxicos aditivos, antagonísticos ou sinérgicos que não podem ser quantificados por métodos analíticos como a determinação da concentração química de cada composto (Walker et al., 2001). Não só é difícil medir as concentrações de todos os compostos de uma amostra de água que podem ter efeitos adversos sobre o ambiente, como é, em geral, incomportável fazê-lo em termos económicos. E, mesmo quando medidos, dada a constituição da mistura, as variações obtidas não são fáceis de relacionar com efeitos nos organismos e, por conseguinte, no ambiente. Para além disso a utilização de análises químicas para determinar o impacto de tóxicos no ambiente pode falhar, tanto porque as análises podem estar incompletas, como porque as concentrações individuais dos contaminantes dissolvidos podem não exceder os valores indicados pela legislação, como ainda porque o potencial tóxico da mistura propriamente dita não foi avaliado.

Assim, nas últimas décadas a avaliação ecotoxicológica de águas subterrâneas efectuada através da realização de bioensaios de toxicidade veio fornecer uma forma de quantificar e avaliar o impacto de misturas complexas. Nestes ensaios os organismos teste são expostos ao efluente de interesse e/ou a várias diluições do mesmo (Walker et al., 2001). Em geral as amostras testadas não são alteradas, mas em alguns casos é mais adequado controlar o efeito de alguns

factores como por exemplo a baixa concentração de oxigénio dissolvido ou o pH excessivamente elevado ou baixo relativamente à gama normal suportada pelos organismos teste.

Os organismos teste comumente utilizados em ensaios de água doce incluem algas unicelulares, microcrustáceos invertebrados (e.g., *Daphnia magna*) e peixes. As respostas destes organismos podem ser utilizadas para identificar áreas de contaminação. O uso de ensaios de avaliação de toxicidade é vantajoso também no sentido em que são em geral mais económicos dos que os métodos químicos convencionais, pois requerem técnicas e equipamentos menos dispendiosos. Em contrapartida, os bioensaios de toxicidade por si só não fornecem informação sobre os contaminantes presentes nas amostras, pelo que é conveniente complementar a informação que fornecem com os resultados de análises químicas. Neste contexto é importante referir a Directiva recentemente aprovada pelo Conselho Europeu relativa à protecção das águas subterrâneas contra a poluição e a deterioração (PE-CONS 3658/06) que recomenda, no seu artigo 3.º, que informação ecotoxicológica seja tida em consideração para a avaliação dos estado químico das águas subterrâneas. A utilização de bioensaios de toxicidade para identificar áreas de contaminação tem-se mostrado muito útil no rastreio de amostras de águas subterrâneas, nomeadamente de águas contaminadas com poluição orgânica proveniente da escorrência de águas de superfície ou com hidrocarbonetos (Baun et al., 2000; Dewhurst et al., 2002; Sheehan et al., 2003). No entanto este tipo de avaliação tem sido efectuado em águas subterrâneas em meios porosos.

4.3. Bioensaios de toxicidade

O potencial tóxico de contaminantes ambientais aquáticos é, regra geral, avaliado através da realização de ensaios laboratoriais padronizados com espécies de organismos invertebrados, peixes e mamíferos. Estes ensaios são podem ser de dois tipos principais: agudos ou crónicos (Cooney, 1995; Walker et al., 2001). Estes dois tipos de ensaios têm o mesmo objectivo geral, mas apresentam diferenças relativamente às concentrações de exposição, à duração, e aos efeitos biológicos estudados.

Nos testes de toxicidade aguda os organismos-teste são expostos a concentrações elevadas do agente tóxico a ser testado, por um curto espaço de tempo (2 a 4 dias) relativamente ao ciclo de vida da espécie, simulando, por exemplo, uma catástrofe que poderá ocorrer num dado local e que envolve a acumulação de grandes quantidades de tóxico no meio aquático. O parâmetro indicativo de toxicidade mais frequentemente utilizado é a morte, expressa pela concentração mediana letal (CL50), ou concentração do tóxico que provoca a mortalidade de 50% dos

organismos testes nas condições específicas de realização do ensaio (Cooney, 1995; Walker et al., 2001).

Nos ensaios de toxicidade crónica os organismos-teste são expostos a concentrações baixas da substância-teste, durante um período de tempo (3 a 5 semanas) considerado longo relativamente ao ciclo de vida da espécie (Cooney, 1995; Walker et al., 2001). Este tipo de testes, tenta, por outro lado, simular as reacções dos organismos a longo prazo, quando sujeitas a concentrações pequenas e contínuas de tóxico, que podem, por exemplo, resultar do lançamento continuado de pequenas porções de pesticida para um lago. Neste caso estudam-se efeitos subletais como parâmetros indicativos de toxicidade. Os mais comuns são, parâmetros de crescimento e reprodução como: o número de ninhadas produzido por cada fêmea, o número de juvenis por ninhada, o número de ovos ou organismos abortados, a inibição do crescimento. Estes ensaios são, contudo, mais morosos e dispendiosos, provocando também maior quantidade de desperdícios do ensaio.

Em águas doces, a toxicidade ambiental é frequentemente avaliada através de testes realizados com espécies consideradas representativas de diferentes níveis tróficos do ecossistema em estudo (Walker et al., 2001; Newman & Unger, 2002). Relativamente aos produtores, os organismos de utilização mais comuns são algas verdes unicelulares, por exemplo das espécies *Chlorella vulgaris* e *Selenastrum capricornutum*. Como consumidores primários utilizam-se invertebrados como, por exemplo, microcrustáceos das espécies *Daphnia magna* e *Daphnia pulex*. Alguns dos consumidores secundários mais utilizados são os peixes das espécies *Brachydanio rerio* (vulgarmente conhecido por peixe zebra), *Poecilia Reticulata* (ou 'guppy') e *Cyprinus carpio* (carpa) (Cooney, 1995).

De um modo geral, nestes ensaios utilizam-se juvenis, por representarem em geral organismos mais sensíveis aos contaminantes do que os organismos mais velhos da mesma espécie. Para além disso, se os juvenis de uma população são afectados, esta tenderá também a diminuir de tamanho por estes terem morrido antes de atingirem a idade reprodutiva (Walker et al., 2001). Tal pode resultar, por um lado, no aumento excessivo de presas daquela espécie, e por outro lado, em falta de alimento para as espécies que se alimentam dela, originando desequilíbrios dos ecossistemas.

Para além disso, nos ensaios de toxicidade nunca devem ser usados organismos que nos dias anteriores à realização dos ensaios apresentem sinais de stress, como descoloração ou comportamentos não habituais, nem juvenis provenientes de organismos que exibam estas características. Organismos em tais situações, podem já estar debilitados ou doentes,

apresentando respostas diferentes, das exibidas pelos organismos saudáveis, quando expostos aos tóxicos e influenciar, por isso, de modo incorrecto os resultados dos ensaios de toxicidade.

4.4. Ensaios baseados em biomarcadores

O aumento constante da poluição do meio aquático e a, subsequente, necessidade de compreender e prever o efeito prejudicial dos poluentes nos organismos, levou os investigadores a procurar parâmetros que permitam detectar os efeitos nocivos antes que eles possam comprometer o funcionamento do ecossistema. Nas últimas décadas efectuaram-se, por isso, esforços no sentido de desenvolver métodos alternativos/complementares aos tradicionais ensaios de ecotoxicidade que sejam mais eficazes na previsão de efeitos tóxicos, mais rápidos e mais económicos. Estes métodos incluem a realização de ensaios utilizando critérios bioquímicos de toxicidade como biomarcadores ambientais.

Os biomarcadores são parâmetros medidos em tecidos de um organismo (e.g., cérebro, fígado, brânquias) ou nos seus sub-produtos (e.g., penas, pêlos, urina) que possam dar indicação de um desvio, relativamente aos valores considerados normais para a espécie, resultante da exposição a contaminantes ambientais ou a outros factores de stress (Guilhermino, 2007).

Os biomarcadores podem ser específicos, quando as respostas biológicas estudadas só ocorrem na presença de poluentes específicos, ou gerais, quando as respostas indicam que há um agente poluente mas não permitem identificar esse agente (Walker, 2001; Martí, 2002). Apresentam a vantagem de serem parâmetros que permitem detectar os efeitos nocivos nos organismos antes que estes possam comprometer o funcionamento do ecossistema. Funcionam, de certo modo, como uma espécie de sistema de ‘alerta precoce’, permitindo a elaboração atempada de medidas preventivas ou de remediação (Guilhermino et al., 1996; Walker et al., 2001).

4.5. A actividade da enzima acetilcolinesterase (AChE)

Um dos biomarcadores mais utilizados no estudo da contaminação de ecossistemas dulciaquícolas é a actividade da enzima acetilcolinesterase (AChE). A AChE tem sido usada como biomarcador de agentes neurotóxicos, quer em estudos laboratoriais quer em estudos de campo, sendo a sua inibição utilizada como critério indicativo de toxicidade.

Sabe-se que esta enzima está presente nos animais, em geral, e a sua determinação laboratorial é relativamente acessível. A AChE actua a nível das sinapses (regiões de comunicação entre células nervosas, fundamentais para a transmissão do impulso nervoso) colinérgicas de organismos vertebrados e invertebrados. É responsável pela degradação do neurotransmissor

acetilcolina após a passagem do impulso nervoso. Quando ocorre inibição da AChE, acumulam-se grandes quantidades de acetilcolina nas sinapses que resultam numa sobre-estimulação da célula pós-sináptica, produzindo contracções rápidas dos músculos voluntários que podem culminar em paralisia (Guilhermino, 1996). Esta situação é normalmente responsável por graves efeitos dos quais, dependendo do nível de inibição da AChE que ocorre, resulta frequentemente a morte dos organismos expostos.

A AChE é fortemente inibida por pesticidas organofosforados ou carbamatos a baixas concentrações (figura 13), e por esta razão, foi utilizada como um biomarcador específico para a exposição a estas substâncias em organismos terrestres, aquáticos e marinhos (Guilhermino, 1996; Guilhermino et al., 2000). Contudo, estudos mais recentes vieram mostrar que a AChE também é inibida por metais, compostos indeterminados de misturas de poluentes, surfactantes, detergentes e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos a concentrações ecologicamente relevantes (Guilhermino et al., 2000).

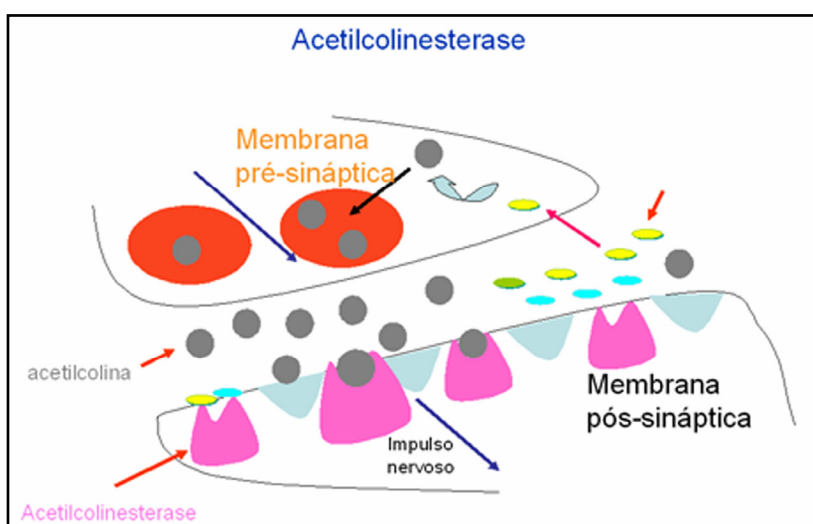


Figura 13. Função da AChE a nível das sinapses colinérgicas de organismos vertebrados e invertebrados (Guilhermino, 2007).

5. AVALIAÇÃO MULTITÉCNICA EM HIDROGEOLOGIA AMBIENTAL

5.1. Caso de estudo I: A área da nascente termal do Poço Quente (Granjão, Peso da Régua): contributo da geofísica aplicada

5.1.1. Generalidades

Pretendeu-se com este estudo apresentar uma nova contribuição em termos da geofísica aplicada à hidrogeologia para apoiar o refinamento do modelo hidrogeológico conceptual das águas termominerais do Poço Quente (localizado próximo da Quinta da Esperança; Espinha Marques et al., 2001a), situado a cerca de 800m para NW do estabelecimento termal de Caldas do Moledo e a, aproximadamente, 300m para NNE da ponte de Granjão (Peso da Régua, N de Portugal).

Neste sector, as descontinuidades de orientação NNE – SSW a NE-SW (subconcordantes com a falha regional de Régua–Verín) a NW–SE (subparalelas à faixa de cisalhamento de Vigo-Amarante-Régua), contribuem, localmente, para o controlo do transporte dos fluidos hidrominerais até à superfície. Este controlo poderá, ainda, depender da estrutura maior, com orientação média E–W (variando de ENE-WSW a ESE-WNW), denominada como falha regional do Rio Douro, Caldas do Moledo (Espinha Marques et al., 2001a), assim como das descontinuidades que lhe são subparalelas, as quais compartimentam em grande o maciço rochoso da encosta Norte do vale do Douro. Deste modo, a falha do Douro funcionaria como estrutura hidrogeológica actuando como barreira, contribuindo para a ascensão dos fluidos hidrominerais.

O enquadramento geológico-estrutural local denuncia um forte controlo litotectónico da circulação hidrogeológica. Assim, a nascente do Poço Quente encontra-se associada a um nó tectónico materializado pela intersecção de uma rede de descontinuidades com orientações médias NW–SE, NNE–SSW e E–W (Espinha Marques et al., 2001b). O enquadramento geotectónico local é, ainda, caracterizado pela proximidade do limite geológico entre as rochas metassedimentares e o granitóide de Cidadelhe (Espinha Marques et al., 2001a).

A nascente do Poço Quente foi identificada durante a realização do inventário hidrogeológico realizado a propósito da definição do perímetro de protecção das captações de água mineral de Caldas do Moledo (Espinha Marques, 2001).

A água do Poço Quente distingue-se das águas subterrâneas normais da região por apresentar características termais, tratando-se de uma água de circuito hidrogeológico mais longo, profundo e lento, com características geoquímicas estáveis (isto é, ao abrigo de flutuações sazonais) e diferentes daquelas das águas subterrâneas normais da região, a temperatura de

emergência é de 22.9°C (quadro 10), a qual permite classificar estas águas como termais de acordo com o critério de Schoeller (1962, 1982).

Quadro 10 - Características físico-químicas da água termomineral do Poço Quente (sector de Granjão, Peso da Régua); segundo Espinha Marques et al. (2003).

Referência	T	pH	Cond.	Na	K	Ca	Mg	Li	HCO ₃	CO ₃	SO ₄	NO ₃	Cl	F	HS	SiO ₂
Poço Quente	22,9	6.7	341	43.0	2.7	19.8	3.5	0.14	68.5	n.d	45.1	8.1	24.4	4.7	n.d.	42.2

Notas: Concentrações em mg/L. T é a temperatura de emergência (°C). O pH e a condutividade eléctrica (µS/cm) foram determinados *in-situ*. n.d. significa não detectado (abaixo do limite de detecção do aparelho); n.d. significa não analisado.

No caso da nascente do Poço Quente e do sistema hidromineral de Caldas do Moledo, esta perspectiva revela-se fundamental para se levar a cabo a exploração dos respectivos recursos hidrominerais e geotérmicos, respeitando o paradigma do desenvolvimento sustentável, o qual implica que a qualidade e a quantidade dos mesmos deverá ser preservada a curto e a longo prazo. A este propósito, convém referir que o Poço Quente se localiza a menos de 100m do limite Oeste da zona alargada do perímetro de protecção das captações de água termomineral de Caldas do Moledo.

5.1.2 Enquadramento geológico e geomorfológico

O sector da Granjão (figura 14) situa-se na Zona Centro-Ibérico do Maciço Ibérico (Ribeiro et al., 1990), mais concretamente enquadra-se nos dois troços principais da falha de Régua-Verín (também designada por Penacova-Régua-Verín; Choffat, 1917; Baptista et al., 1998); e o segmento Amarante-Régua relacionado com o megacisalhamento de Vigo-Régua (também designado por Vigo-Vila Nova de Cerveira-Régua).

Neste sector, o traçado do vale do Douro apresenta duas orientações principais: WNW-ESE (relacionada com o megacisalhamento de Vigo-Régua) e NNE-SSW (relacionada com a falha de Régua-Verín). Trabalhos regionais prévios (e.g., Choffat, 1917; Acciaiuoli, 1952/53; Cabral, 1995; Baptista et al., 1998) apontam para a existência de um controlo morfoestrutural das nascentes hidrominerais localizadas ao longo da depressão de Penacova-Régua-Verín. De acordo com Baptista et al. (1998) as características tectónicas e morfoestruturais são preponderantes para a

explicação da génese das ocorrências hidrominerais, devido à criação de zonas de maior permeabilidade por fracturação.

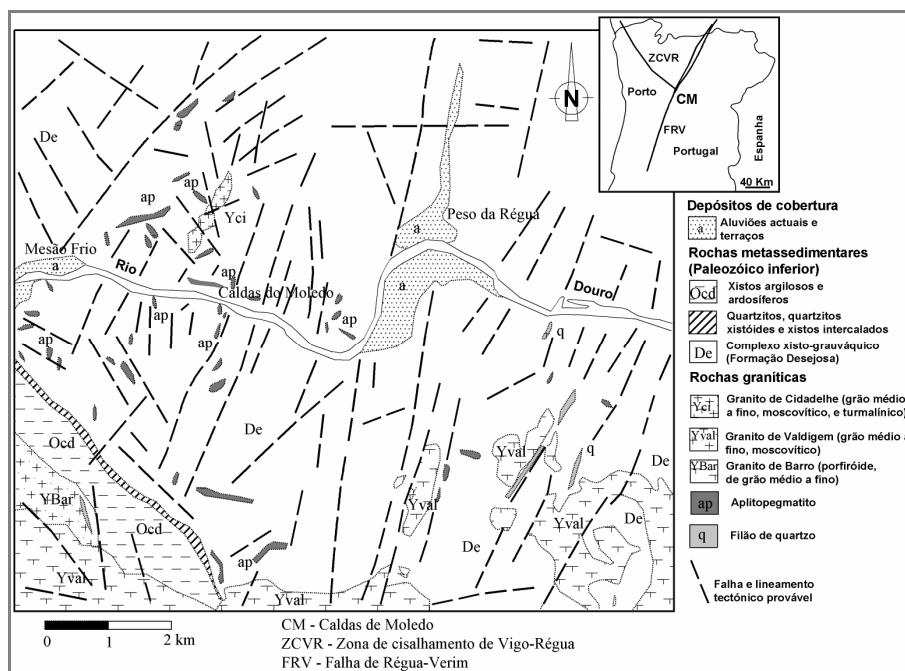


Figura 14 - Mapa geológico-estrutural de Granjão, Peso da Régua (segundo Espinha Marques et al., 2001a).

A geomorfologia da região envolvente do sector de Granjão-Caldas do Moledo (figuras 15, 16 e 17) é dominada pelo entalhe profundo do vale do rio Douro (e de alguns dos seus afluentes) enquadrado, a Norte, pelos cumes de natureza xisto-quartzítica da serra do Marão (1415m de altitude) e, a Sul, pela serra das Meadas (1141m de altitude). Nesta região, o vale do rio Douro encaixado, excepto na área da cidade de Peso da Régua, onde se desenvolve um vale de fundo mais amplo.

O vale do rio Douro é bastante sinuoso e encaixado, dando origem a desníveis importantes entre o leito do rio (cerca 50m de latitude) e os cumes adjacentes, dos quais se destacam os que correspondem aos vértices geodésicos de Santa Sabina (443m), de Mesquitela (729m) e de Rojão (886m). A rede de drenagem apresenta, com frequência, troços de linhas de água rectilíneas, com inflexões súbitas, sendo numerosos os paralelismos entre conjuntos de linhas de água. Estas evidências denunciam, de imediato, um forte controlo estrutural regional.

O vale da ribeira da Seromenha, onde se localiza a nascente do Poço Quente, apresenta dois tipos de perfil topográfico distintos. Assim, na área granítica, o rio tem um traçado rectilíneo num vale profundo e em V apertado, enquanto nos xistos forma um vale ligeiramente mais largo e o curso de água segue um traçado sinuoso. Neste local, verifica-se que, no fundo do vale talhado no granito, se desenvolve o nível aplanado antigo, ao qual se seguiu o encaixe actual.

O sector terminal desta ribeira parece ser condicionada tectonicamente, já que é concordante com a direcção média da falha de Régua-Verín e está na continuidade num importante alinhamento tectónico (vale da ribeira de S. Martinho, homólogo da ribeira da Seromenha) e desenvolvimento topográfico na margem esquerda do rio Douro.

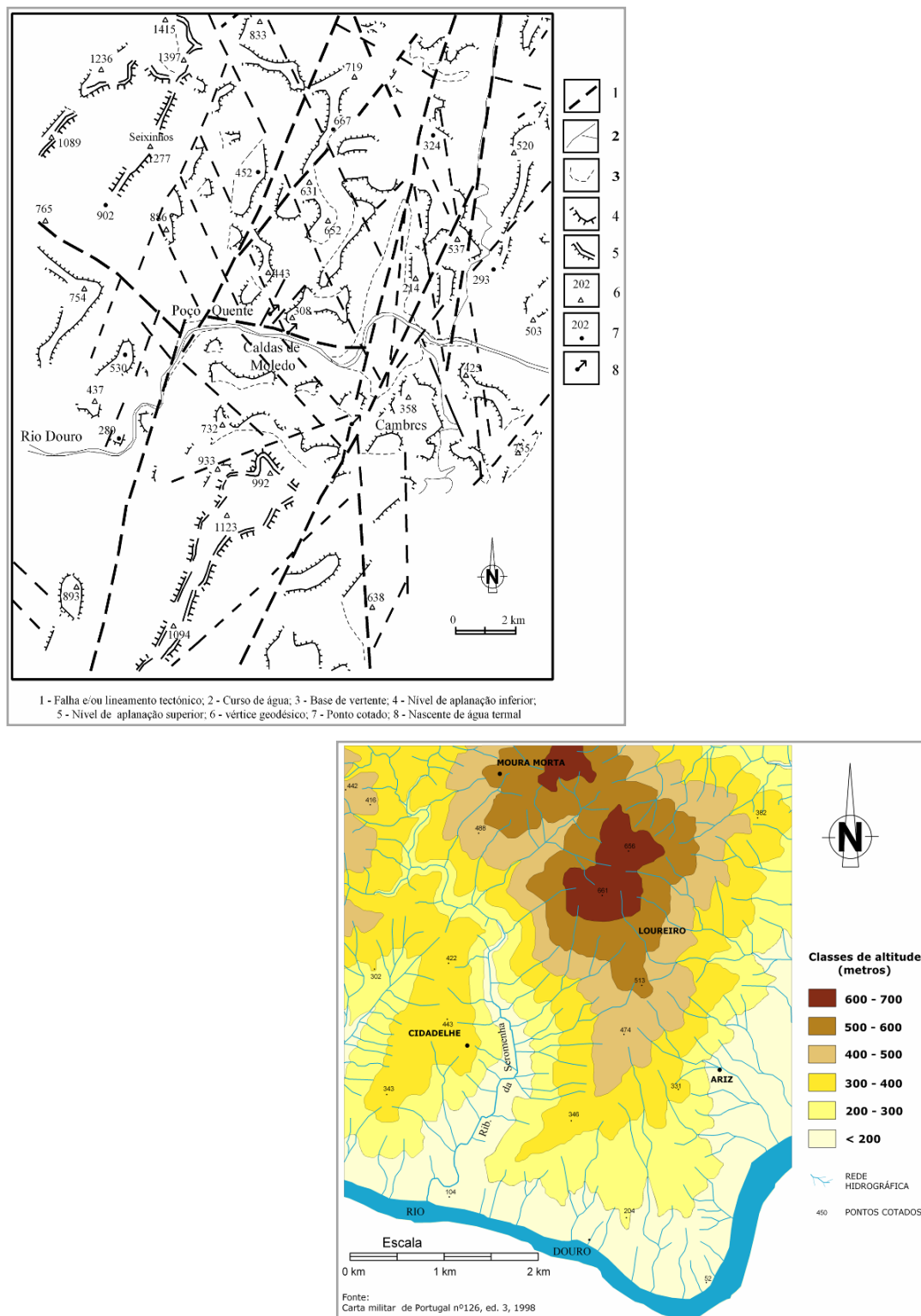


Figura 15 - Esboço geomorfológico regional e mapa hipsométrico da área do Granjão.

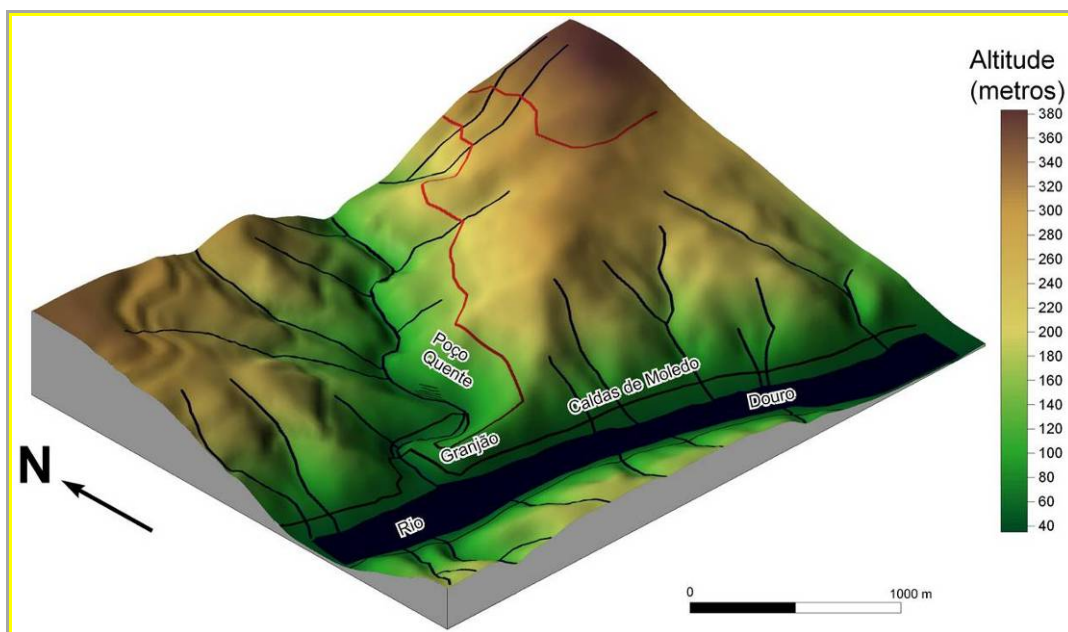


Figura 16 - Modelo digital de terreno do Granjão, com a localização da área do Poço Quente.

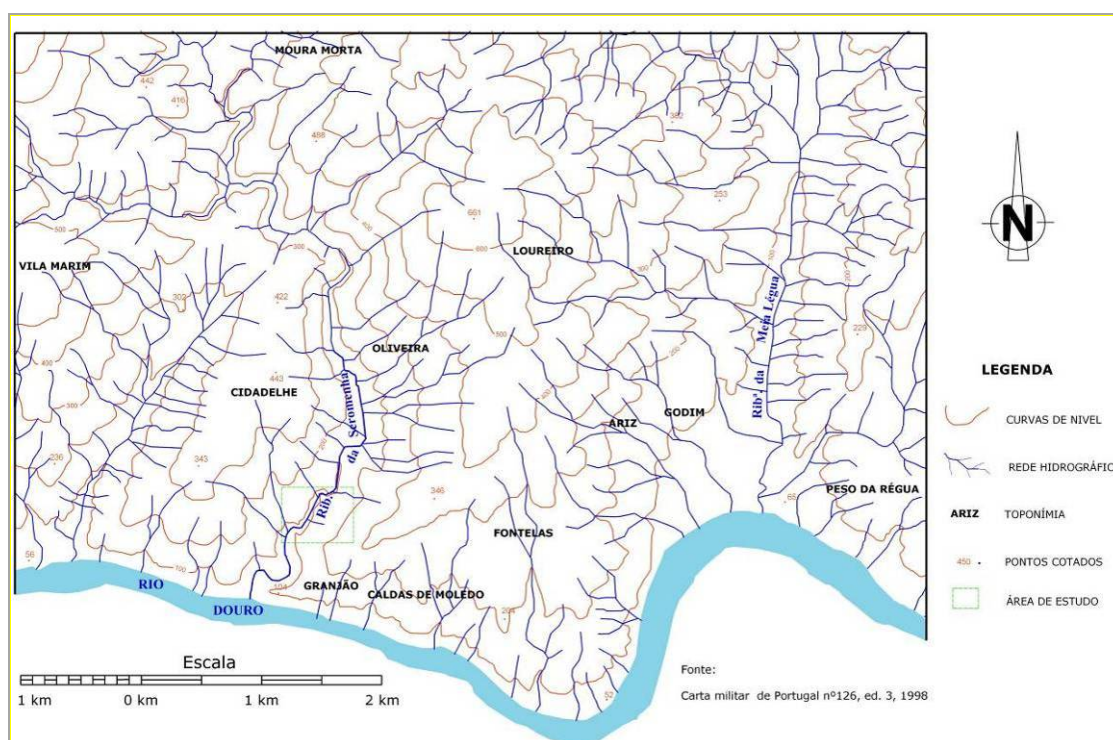


Figura 17 - Enquadramento topográfico da área do Granjão.

5.1.3. Geologia, hidrogeologia e geotecnia local

Na região envolvente do sector de Granjão (figura 18) ocorrem, fundamentalmente, rochas metassedimentares de idade Câmbrica inferior enquadradas no “Complexo Xisto-Grauváquico” (Formação de Desejosa) do Grupo do Douro (Bernardo de Sousa, 1982, 1983; Bernardo de Sousa & Sequeira, 1989).

As rochas metassedimentares constam de metapelitos que apresentam, localmente, cor cinzenta clara a escura, alternando com níveis metapsamíticos esbranquiçados, exibindo o conjunto, um aspecto listrado. Foram também reconhecidos níveis de rochas calcossilicatadas. A unidade metapelítica apresenta-se, em regra, como um conjunto muito homogéneo, monótono, e exhibe um foliação muito acentuada.

Foi identificado um afloramento granítico que se entende pelo vale da ribeira da Seromenha (próximo da localidade de Cidadelhe), ao longo de *ca.* 1500m, com uma largura que chega a atingir os 200m (Espinha Marques, 2001; Espinha Marques et al., 2001a,b). O granitóide é de grão médio a fino, moscovítico e com turmalina. Esta fácies apresenta características petrográficas similares às descritas para os granitos de Valdigem (Teixeira et al., 1967) e de Favaio (Bernardo de Sousa & Sequeira, 1989). O granitóide de Cidadelhe encontra-se associado especialmente a alinhamentos tectónicos de orientação geral NNE-SSW e WNW-ESE. O contacto com o encaixante metassedimentar é brusco e tectónico. Ocorrem, ainda, neste sector, numerosos filões e massas aplitopegmatíticas e pegmatíticas, instaladas em zonas de fractura na unidade metassedimentar.

No que diz respeito às características geomecânicas do maciço, embora as características de resistência ao corte do maciço rochoso sejam essencialmente dependentes das descontinuidades, é de grande utilidade o conhecimento da resistência à compressão do material-rocha. A determinação do índice de resistência à carga pontual, recorrendo à determinação da dureza com o esclerómetro portátil ou *martelo de Schmidt*, pode conduzir à estimativa do valor da resistência uniaxial.

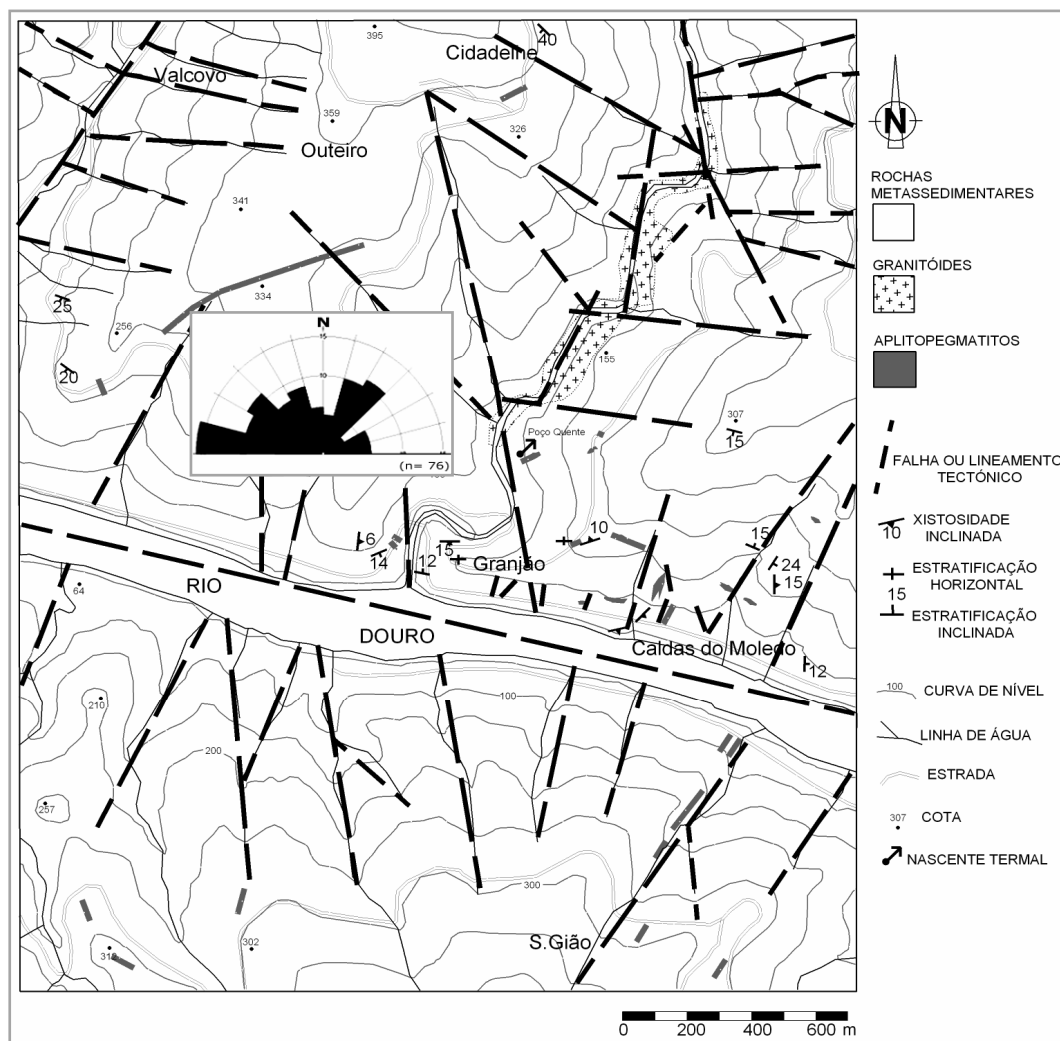


Figura 18 - Esboço geológico da área do Granjão, com a representação de um diagrama de rosetas com as direcções principais das discontinuidades da área em estudo (n=76 discontinuidades).

O esclerómetro portátil consiste, em traços gerais, num aparelho que permite um ensaio de campo que avalia a dureza do material-rocha através da medição do ressalto de uma massa de aço quando percutida sobre a superfície da rocha. As condições gerais para o ensaio de campo ser válido assentam nos seguintes pontos, a saber: limpeza da zona do ensaio, verificação da ausência de fissuras e eliminação da patina de rocha meteorizada. Na execução do ensaio, o aparelho foi posicionado perpendicularmente à superfície estrutural a ser ensaiada.

Em função da dureza (ou resistência) da rocha, a massa de aço sofre maior ou menor ressalto; seguidamente, o valor é registado numa escala (0-100) do aparelho. Registaram-se 10 percussões com o martelo e eliminaram-se os 5 valores mais baixos, tendo-se considerado, por fim, o valor médio destas medições. Finalmente, recorre-se ao ábaco de Miller (ISRM, 1978) para

determinar a resistência à compressão simples a partir da dureza de Schmidt e da densidade média da rocha (a densidade estimada para o granito de Cidadelhe foi de 26 KN/m³ e para a corneana metapelítica foi de 28 KN/m³).

No trabalho de campo foi utilizado o esclerómetro portátil (vulgarmente conhecido por *martelo de Schmidt*) do tipo L, da marca PROCEQ, SA (Zurich, Switserzland), do Laboratório de Mecânica das Rochas (LGMC) do Departamento de Engenharia Geotécnica (ISEP). Pela análise dos resultados do quadro 11 constata-se que nas zonas do maciço granítico menos alteradas (W₁₋₂) os valores de resistência uniaxial à compressão variam em média entre 190 a 240 MPa; enquanto que o maciço metassedimentar apresenta um valor de resistência à compressão de 140 MPa.

Quadro 11 – Dados geotécnicos do maciço rochoso (R.M. – Rocha metassedimentar; R. G. – Rocha Granítica).

Estações	Grau de alteração	Média das leituras máximas	Resistência à compressão simples (MPa)	Classificação da resistência (ISRM, 1981)
E ₁ , R.G.	W ₁₋₂	60,40	240	S ₁₋₂
E ₂ , R.G.	W ₁₋₂	55,10	190	S ₁₋₂
E ₃ , R.M.	W ₁₋₂	46.60	140	S ₁₋₂

O inventário de pontos de água, ou inventário hidrogeológico, incidiu na envolvente à área do Poço Quente. Os pontos inventariados foram os seguintes (anexo 8):

- ➡ Ribeira da Seromenha
- ➡ Zona do perfil 3, escorrência do Poço Quente
- ➡ Nascente do Poço Quente

5.1.4. Levantamento geofísico

5.1.4.1. Introdução

Foram realizados trabalhos de prospecção electromagnética na nascente termal do Poço Quente, com o objectivo de detectar estruturas geológicas favoráveis à ocorrência de água termal. O estudo iniciou-se com um reconhecimento prévio de campo, onde foram acertados aspectos práticos da execução dos trabalhos. O presente tópico contém o conjunto de trabalhos

realizados e as metodologias utilizadas no processamento e interpretação dos resultados, bem como as conclusões dos trabalhos desenvolvidos.

5.1.4.2. Metodologia

Nesta campanha foi utilizada, como se referiu anteriormente, o condutímetro electromagnético *Geonics* modelo EM34-3 que permite a leitura directa da condutividade aparente (mS/m) à superfície do terreno. Este instrumento é constituído por um transmissor que gera um campo electromagnético a uma determinada frequência e uma certa amplitude, e de um receptor que recebe um campo secundário de idêntica frequência. O transmissor pode operar a três distintas frequências (6.4 kHz, 1.6 kHz, 0.4 kHz) que são seleccionadas automaticamente em função da distância entre o transmissor e receptor (10, 20 e 40 m).

Para cada distância entre bobines (transmissor e receptor), efectuaram-se duas leituras de condutividade utilizando as configurações dipolo horizontais (bobines com os eixos na horizontal) e dipolo vertical (bobines com os eixos na vertical). Foram feitas leituras de 5 em 5 metros e cada leitura foi referida à localização da bobine transmissora.

A profundidade de investigação teórica é limitada apenas pelo espaçamento entre bobines e a sua configuração, ou seja consoante se utilize o dipolo vertical ou o dipolo horizontal. No quadro 6 encontram-se representadas as profundidades de investigação para cada tipo de espaçamento e disposição de bobines.

5.1.4.3. Levantamento geofísico de terreno

O trabalho de campo foi realizado em Maio de 2005, que culminou na realização de cinco (5) perfis de electromagnética. Os perfis foram orientados segundo uma direcção e sentido aproximados de NW-SE, sensivelmente paralelos entre si e transversais à rede de fracturação regional (E-W) detectada em estudos anteriores (Espinha Marques et al. 2001a,b, 2003. A vegetação intensa (figura 19) as infra-estruturas (antigo moinho, etc.) existentes no local condicionaram o comprimento dos perfis e consequentemente a utilização do cabo de 40 metros. Na figura 20 encontra-se a localização dos perfis.

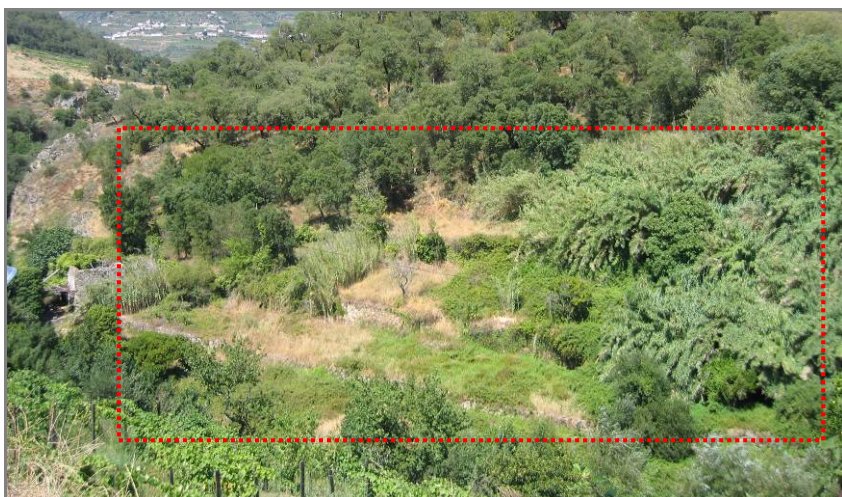


Figura 19 - Área em estudo da nascente termal do Poço Quente, Granjão.

As principais características dos perfis de resistividade eléctrica são apresentadas no quadro 12.

Quadro 12 - Perfis de electromagnética: principais características.

Referência	Comprimento (m)	Espaçamento entre bobines (m)	Profundidade máxima teórica (m)
P1	60.0	10 e 20	25.3
P2	60.0	10 e 20	25.3
P3	70.0	10, 20 e 40	50.6
P4	90.0	10, 20, e 40	50.6
P5	100.0	10, 20 e 40	50.6

Os principais indicadores dos valores de condutividade obtidos apresentam-se no quadro 13.

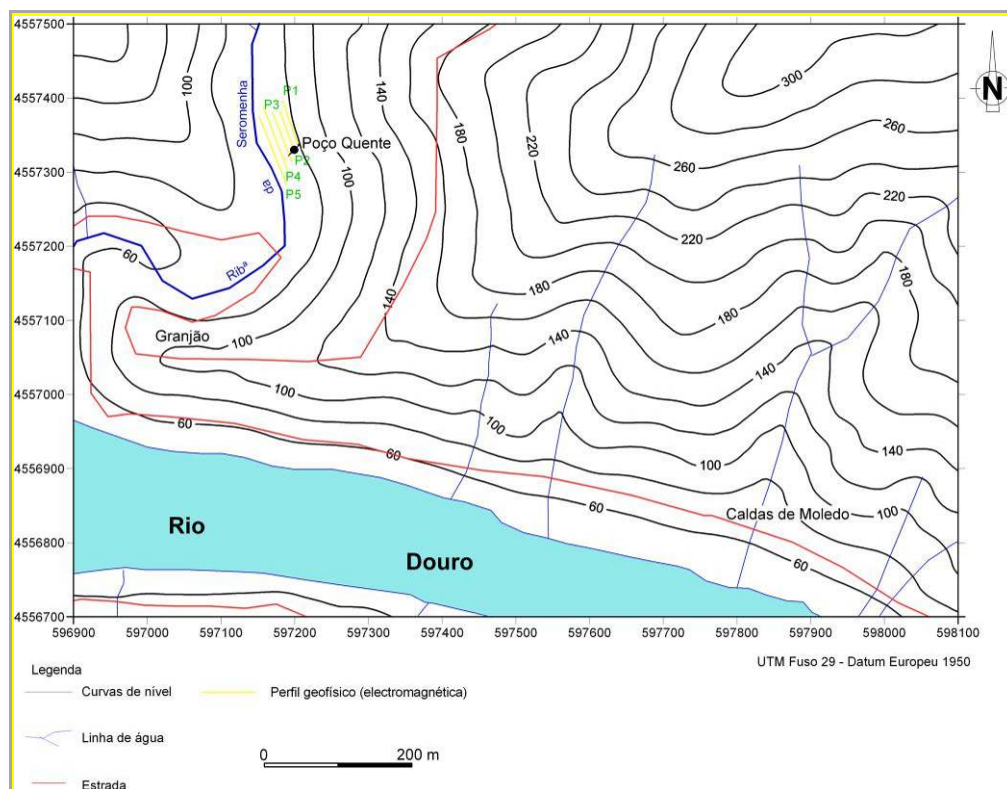


Figura 20 - Localização dos perfis de electromagnética, na área estudada.

Quadro 13 - Valores de condutividade eléctrica: principais indicadores numéricos.

Perfil	Condutividade (mS/m)				Número de pontos de medida
	Mínima	Máxima	Média	Desvio padrão	
P1	0.80	8.00	4.53	1.87	46
P2	2.20	8.80	5.24	1.67	40
P3	-0.80	9.00	4.06	2.74	58
P4	-0.40	7.6	3.63	2.11	84
P5	-0.50	7.00	3.43	1.73	96

As condutividades obtidas oscilaram entre -0.8 e 9.00 mS/m, num total de 324 valores de condutividade eléctrica. O valor mínimo e máximo foram registados no perfil P3, sendo, também, este perfil o que exhibe maior variabilidade nos valores de condutividade eléctrica. Observa-se que o perfil P2 apresenta um maior valor médio e menor variabilidade nos valores de condutividade eléctrica.

Nem sempre foi possível tirar medidas em alguns pontos pois os valores das leituras obtidas não eram constantes, o que revelava a existência de algum ruído, possivelmente devido à presença de cabos aéreos de electricidade que cruzam a área em estudo. Estes valores não foram considerados na interpretação.

5.1.4.4. Interpretação geofísica: considerações conclusivas

Os valores de condutividade obtidos no campo constituíram, conjuntamente com a posição do transmissor, um ficheiro x, y, z, referido às coordenadas UTM Fuso 29 – Datum Europeu 1950. Após regularização de malha por *krigagem* foi obtida uma série de secções de condutividade aparente para os diferentes perfis de acordo com as profundidades de investigação (quadro 12).

Na análise e interpretação dos dados de campo teve-se sempre presente que o elevado grau de alteração e de fracturação se traduz, em termos geofísicos, por um alto valor de condutividade eléctrica das formações, uma vez que a permeabilidade das formações geológicas é função directa desses factores.

Da análise dos anexos nº 2, 3, 4, e 5 verifica-se, de um modo geral, que os perfis P1, P3, P4 e P5 são muito semelhantes, observando-se em toda a extensão dos perfis uma grande homogeneidade lateral nos valores de condutividade e uma diminuição gradual em profundidade nos valores de condutividade. Os valores de condutividade inferiores a 2.5 mS/m (representados a tons de azul) encontram-se a profundidades de investigação inferiores a 20 metros, com excepção no perfil P1, entre os pontos 42 m e 55 m, e no perfil P3, entre os pontos 35 m e 53 m, o que poderá indicar que em certas zonas o maciço rochoso se encontra a uma menor profundidade.

No perfil P2 observa-se ao longo de todo o perfil e até aos 25 metros de profundidade que os valores de condutividade são superiores a 2 mS/m, o que reflecte a presença de uma zona mais condutora, ou seja com maior porosidade e/ou alteração.

No Anexo 6 apresenta-se uma série de mapas resultantes da integração de todos os dados obtidos a partir da prospecção electromagnética. Da observação dos mapas é evidente a diminuição gradual da condutividade em profundidade. No mapa c) observa-se, ao longo do perfil P2, uma banda mais condutora. A partir dos 30 metros de profundidade teórica os valores de condutividade são muito baixos e homogéneos, reflectindo a diminuição da alteração e/ou porosidade do maciço rochoso.

A partir da execução dos perfis electromagnéticos poderemos apontar as seguintes aspectos conclusivos (figura 21):

- Pela análise dos perfis e do mapeamento geofísico, além do cruzamento com a geologia da área do Poço Quente, poder-se-á definir um alinhamento geoeléctrico com orientação média WNW-ESE e a anomalia geoeléctrica NNW-ESE poderá materializar um corpo granítico (este poderá corresponder ao granito de Cidadelhe ou a um filão pegmatítico) em profundidade.
- O meio prospectado, na sua globalidade, apresenta variabilidade no parâmetro condutividade eléctrica em profundidade. Assim, dever-se-ia prosseguir este estudo com métodos geofísicos com uma maior penetração. Porém, esta abordagem preliminar apoia inequivocamente o modelo hidrogeológico conceptual defendido por Espinha Marques et al. (2001a,b, 2003) para a área.

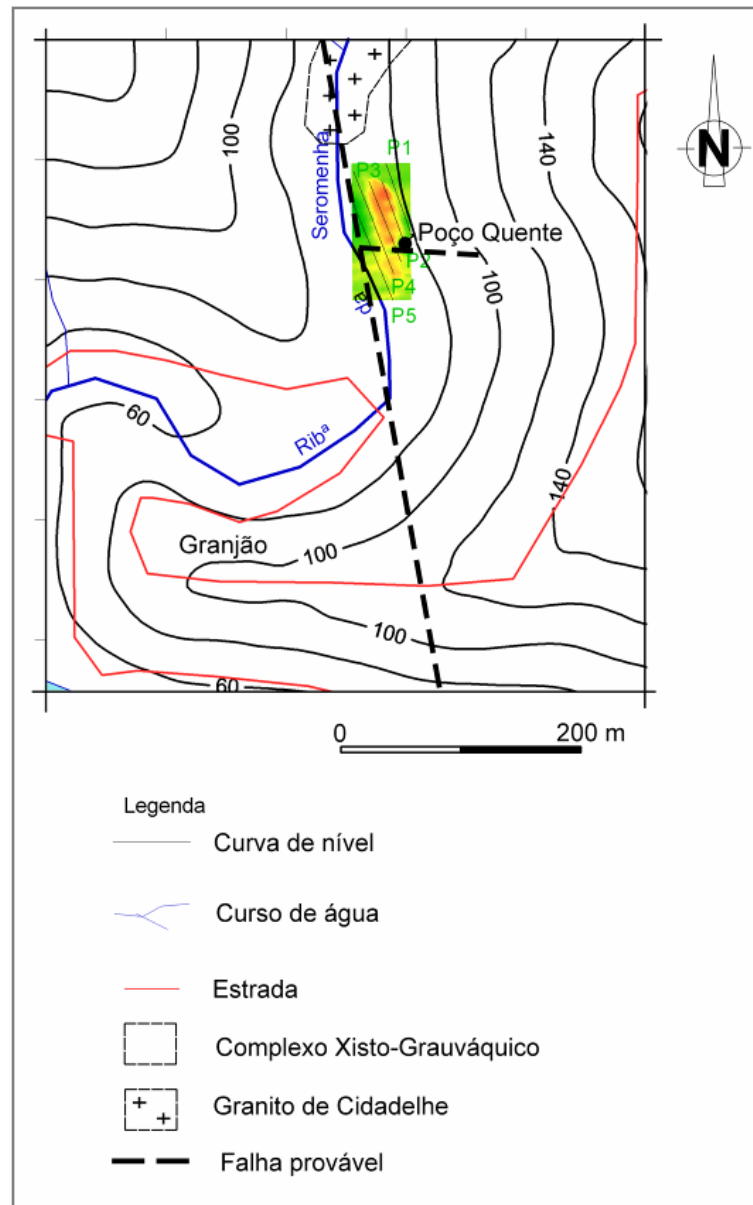


Figura 21 - Mapa interpretativo com o cruzamento dos dados geofísicos e hidrogeológicos

5.2. Caso de estudo II: Estudo de efeitos ecotoxicológicos sub-letais da água subterrânea do Manancial de Paranhos em *Daphnia magna*

5.2.1. Generalidades

A cidade do Porto está localizada na margem direita do Rio Douro, no NW de Portugal, sendo uma das cidades mais antigas da Europa. A história da cidade do Porto remonta, pelo menos, ao século VI, desde o tempo dos Suevos. A conquista do designado Portucale, em 868 A.D., a primeira designação da região do Porto, é considerada como um dos acontecimentos mais importantes da história antiga da cidade do Porto. No entanto, depois de 868 A.D., esta cidade tornou-se o centro do movimento da reconquista cristã na Península Ibérica. A cidade do Porto tornou-se uma importante urbe desde o século XII e tem-se desenvolvido ao longo das escarpas graníticas do Rio Douro. A zona histórica da cidade, face ao seu espólio arquitectónico e histórico, conduziu ao seu reconhecimento como património mundial da UNESCO em 1996 (Afonso et al., 2007a,c)

A água subterrânea do Manancial de Paranhos constituiu a principal fonte de abastecimento de água potável à cidade do Porto, por mais de cinco Séculos, até aproximadamente à segunda década 20, do século XX (e.g., Bourbon & Noronha, 1885; Carteador Mena, 1908; Fontes, 1908). Efectivamente, entre o século XIV e o início do século XX, o Porto foi possuidor de uma rede de fontes e chafarizes que abasteciam toda a cidade de água para uso público (Afonso et al., 2007b,c). Não obstante, o registo histórico mais antigo que relata o abastecimento de água à cidade do Porto remonta a 1392 (Amorim & Pinto, 2001). Estas fontes eram, por sua vez, abastecidas por água subterrânea de vários mananciais. Actualmente, em algumas partes da cidade podem ainda encontrar-se algumas dessas fontes e chafarizes. Entre os mananciais mais importantes conta-se o de Paranhos que abastecia a maior parte da cidade ((e.g., Bourbon & Noronha, 1885; Ferreira da Silva, 1889; Carteador Mena, 1908; Fontes, 1908; SMAS, 1961; Afonso, 1997, 2003; Afonso et al., 2006a,b, 2007b,c). Há registos antigos que referem a existência de três fontes no local de Arca de Água, motivo pelo qual o manancial de Paranhos era também designado por Arca das Três Fontes. Por alvará real, outorgado pelo Rei D. Filipe I, a água deste manancial foi encanada em caleiras graníticas (Figura 22) e protegida por um sistema de túneis que percorre a cidade.

Com a busca e utilização de alternativas ao abastecimento de água à cidade, a utilização desta água foi progressivamente posta de parte, não servindo hoje em dia nenhum fim específico. Acresce ainda que na região envolvente do manancial, o ordenamento rural está organizado segundo unidades que apresentam grande proximidade entre a origem da água e o depósito de

efluente (fossa), o que leva muitas vezes ao contacto entre a captação de água e o esgoto provocando a contaminação do aquífero.



Figura 22. Caleira de granito por onde circula a água do Manancial de Paranhos.

5.2.2. Enquadramentos geográfico, geológico e hidrogeológico da cidade do Porto

O Porto é uma cidade pertencente ao distrito do Porto (do qual é a sede de distrito), encontrando-se geograficamente inserida na Região Norte, mais concretamente na província do Douro Litoral.

Em termos geológicos (figura 23), a cidade do Porto localiza-se num domínio geotectónico complexo do Maciço Ibérico (MI), i.e., entre os terrenos da faixa metamórfica de Espinho–Albergaria-a-Velha e o Sulco Carbonífero Dúrico-Beirão (Chaminé, 2000; Pinto de Jesus, 2001; Chaminé et al., 2003). Esta região situa-se, assim, ao longo da sutura, dextra, com direcção geral NNW–SSE — faixa de cisalhamento de Porto–Coimbra–Tomar (Zona de Ossa-Morena, ZOM) — que contacta com a Zona Centro-Ibérica (Ribeiro et al., 1990).

O granito do Porto aflora em grande parte da cidade do Porto (Almeida, 2001), estendendo-se ainda para os concelhos de Vila Nova de Gaia, Matosinhos e Maia, contactando, a Leste, com uma extensa mancha de rochas metassedimentares (tradicionalmente incluída no “Complexo Xisto-Grauváquico”; Carrington da Costa & Teixeira, 1957) e, a Oeste – Sudoeste, com uma série de unidades tectonoestratigráficas de médio a alto grau metamórfico típicas da ZOM (Complexo Metamórfico da Foz do Douro; Chaminé et al., 2003).

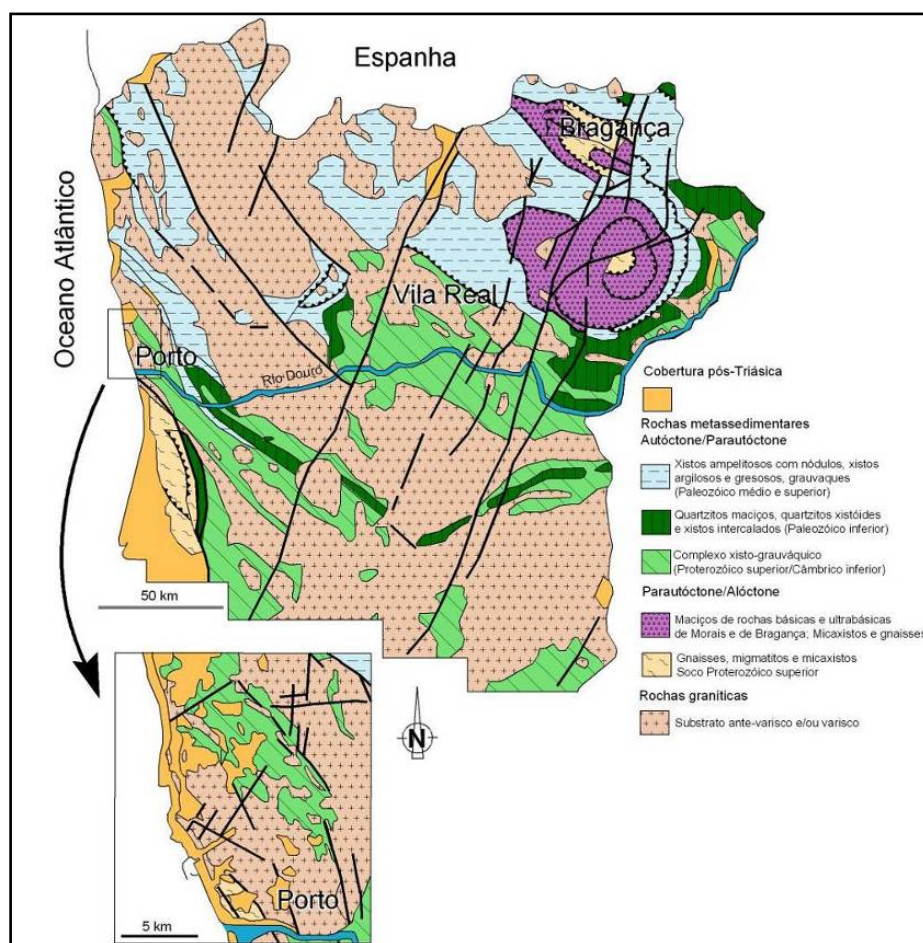


Figura 23 - Enquadramento geológico da região do Porto no Norte de Portugal (simplificado de Oliveira et al., 1992; adaptado de Afonso, 1997, 2003 e de Afonso et al., 2004).

Quanto ao clima da cidade do Porto, as características pluviométricas da cidade e da região envolvente em geral, estão condicionadas, com maior incidência, pelas perturbações atmosféricas de Oeste e pelas situações depressionárias em conjunto com os fluxos marítimos, as quais mantêm ainda, nesta área próxima do oceano, as suas propriedades higrométricas (Velhas, 1991; Monteiro, 1997). A precipitação média anual na região do Porto é cerca de 1152mm, correspondendo o corpo central da estação chuvosa, fundamentalmente, aos meses de Outono e Inverno. Relativamente à temperatura, a média anual nesta região é de 14°C, sendo o mês mais frio o de Janeiro e o mês mais quente o de Julho (Afonso, 1997, 2003).

Em termos hidrogeológicos e atendendo, nomeadamente, às características litológicas, estruturais e geomorfológicas, COBA (2003) definiu para a cidade do Porto, cinco unidades hidrogeológicas com diferentes características (quadro 14).

Quadro 14- Principais características das unidades hidrogeológicas (adaptado de COBA, 2003).

Unidades hidrogeológicas	Litologia	Permeabilidade	Alimentação	Importância	Vulnerabilidade à contaminação	Problemas Geotécnicos
Uh1 Aquífero aluvial com limites permeável a semipermeável	Aluvião	Média, por vezes alta	Directa por infiltração e profunda a partir de fronteira permeável a semipermeável	Aquífero importante quando apresenta espessuras significativas	Maior vulnerabilidade devido ao carácter superficial do aquífero e à sua permeabilidade média, por vezes alta	Importantes devido à ocorrência do nível freático a pequena profundidade. Dificuldades na execução da maioria das obras correntes
Uh2 Aquífero superficial com permeabilidade fissural	Maciço rochoso W3 a W2, F3 a F4 5	Média, por vezes alta	Directa por infiltração	Importante no caso de constituírem aquíferos permanentes, bem como na recarga de aquíferos adjacentes	Maior vulnerabilidade por possuir permeabilidade fissural e devido ao facto de ser superficial	Dificuldades na construção de obras subterrâneas e escavações
Uh3 Aquífero superficial com permeabilidade intersticial, livre	Aterros, depósitos de terraço, coluviões, solos residuais e maciço W4-5	Média a baixa	Directa por infiltração e profunda a partir do substrato permeável a semipermeável	Variável dependendo da espessura da formação	Média a baixa devido à permeabilidade moderada	Por vezes importantes devido à possibilidade de ocorrerem níveis freáticos pouco profundos e de níveis suspensos
Uh4 Aquífero profundo, confinado ou semiconfinado	Solos residuais e/ou maciço W4-5, subjacente a solos muito caulinizados	Média a baixa	Directa por infiltração através dos limites permeáveis e semipermeáveis, profunda a partir do substrato permeável e indirecta por drenância vertical das formações semipermeáveis a impermeáveis	Aquífero importante a moderadamente importante consoante a natureza e continuidade do aquífero	Baixa devido à profundidade do aquífero e à presença de formações semipermeáveis a impermeáveis à superfície	Importante devido à saturação dos níveis caulinizados e à eventualidade de artesianismo
Uh5 Sistema aquífero superficial com permeabilidade intersticial, livre, sobrejacente a formação semipermeável a impermeável, sobre aquífero profundo confinado ou semiconfinado	Aquífero superficial: aluvião e depósitos de terraço Aquífero confinado ou semiconfinado: solos residuais e maciços W4-5	Aquífero superficial: média, por vezes alta Aquífero profundo confinado ou semiconfinado: média a baixa	Aquífero superficial: idem Uh1 Aquífero profundo confinado ou semiconfinado: idem Uh4	Aquífero superficial: idem Uh1 Aquífero profundo confinado ou semiconfinado: idem Uh4	Aquífero superficial: idem Uh1 Aquífero profundo confinado ou semiconfinado: idem Uh4	Aquífero superficial: idem Uh1 Aquífero profundo confinado ou semiconfinado: idem Uh4

5.2.3. O Manancial de Paranhos: enquadramentos

O traçado subterrâneo do Manancial de Paranhos tem cerca de 3 km e localiza-se a uma profundidade que varia desde a superfície até *ca.* de -20m. O seu trajecto pode ser dividido nos seguintes tramos (figura 24): i) Túnel 1. Jardim de Arca d'Água – Rua Nova do Regado (ca. 1km); ii) Túnel 2. Rua de S. Dinis – Rua dos Burgães (ca. 2km); iii) Túnel 3. Rua dos Burgães – Largo de Alberto Pimentel (Afonso et al., 2006a,b, 2007b). As águas do manancial de Paranhos são conduzidas na sua maior parte em caleiras abertas em granito (figura 25).

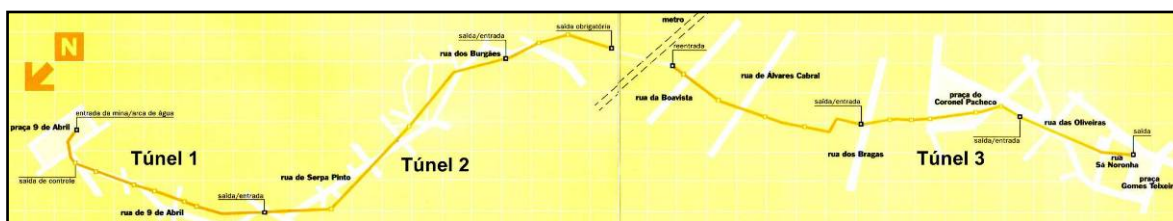


Figura 24 - Percurso esquemático dos túneis do manancial de Paranhos: Túnel 1. Jardim de Arca d'Água – Rua Nova do Regado; Túnel 2. Rua de S. Dinis – Rua dos Burgães; Túnel 3. Rua dos Burgães – Largo de Alberto Pimentel (base topográfica: *folheto dos SMAS*; s/ escala).



Figura 25 – Manancial de água subterrânea de Paranhos, na Arca Maior localizada no subsolo do jardim de Arca d'Água.

Em termos hidrogeológicos, o traçado em estudo está implantado em duas unidades geológicas regionais, as rochas graníticas e os aluviões (figura 26).

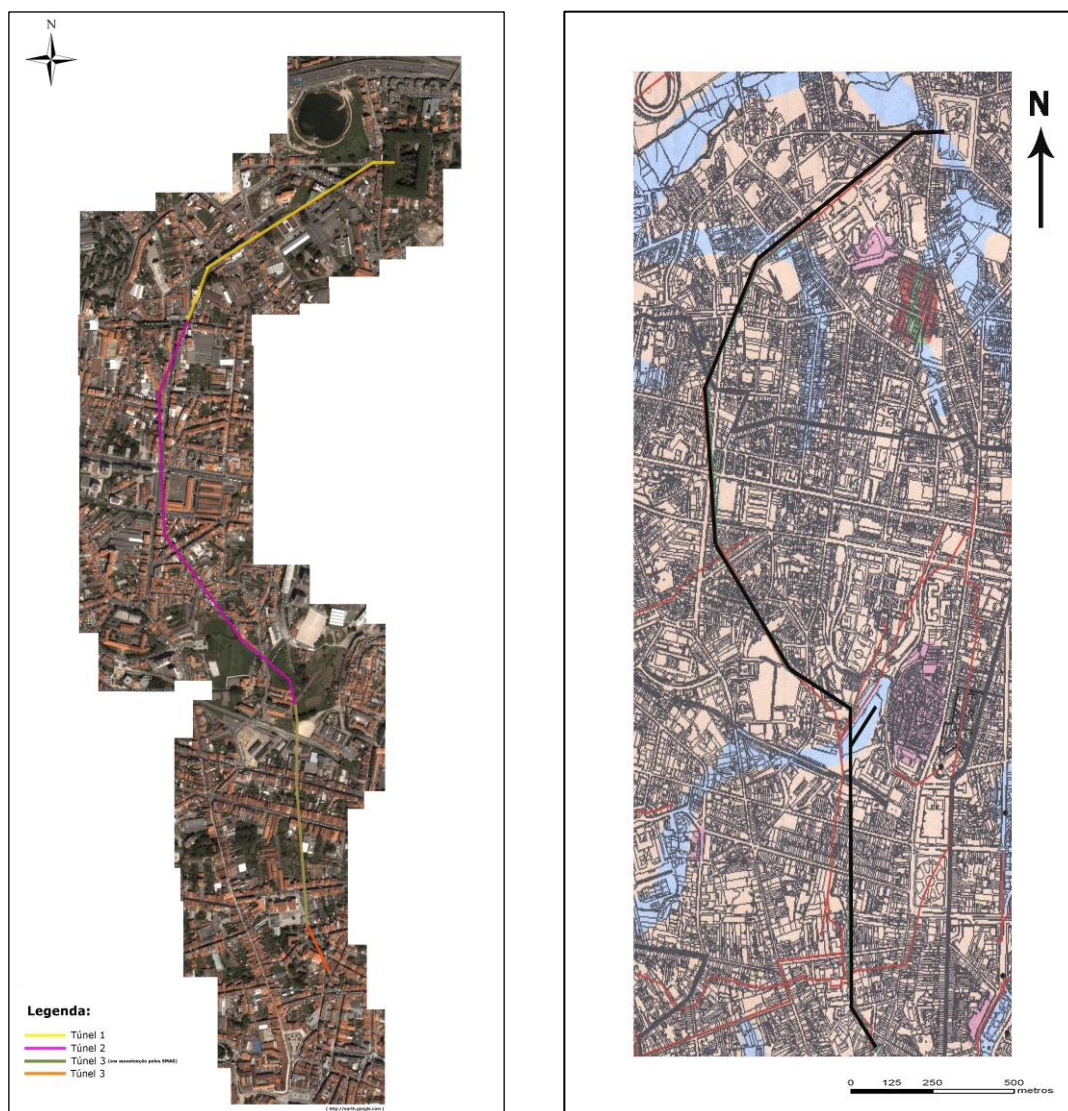


Figura 26 – Enquadramento do túnel de Paranhos (adaptado de Seabra, 2006): i) Traçado da rede do túnel de Paranhos (base: imagem aérea [www. google-earth.com](http://www.google-earth.com)); ii) Enquadramento hidrogeológico (extracto da “Carta Hidrogeológica” da Carta Geotécnica do Porto (COBA, 2003) na área de estudo. A mancha rosa corresponde à unidade Uh1 e a mancha azul corresponde à unidade Uh3. A traço negro está representado o traçado total do túnel).

5.2.3.1. Hidroquímica e fontes de contaminação: caracterização geral

Em termos hidroquímicos, a maioria das águas do Manancial de Paranhos é sulfatada cálcica ou bicarbonatada cálcica, em geral, com valores elevados de nitrato (Afonso et al., 2007b,c). Com o objectivo de avaliar a sua potencial utilização para água de rega de jardins públicos e lavagem de rua, como forma de poupança e gestão optimizada de água de melhor qualidade, foi iniciado em 2005 um estudo detalhado do carácter hidrogeoquímico e do potencial ecotoxicológico deste aquífero, instalado predominantemente em rochas graníticas e xistos, as quais são rochas de baixa permeabilidade em que a circulação de água se associa às fracturas e às zonas de alteração (Afonso et al., 2006a; Afonso, *in prep.*).

Estudos preliminares indicaram que esta água é rica em nitratos e sulfatos, confirmando a sua inadequabilidade para consumo humano, apresentando contudo uma salinidade média e um baixo risco de alcalinização para efeitos de irrigação (Afonso et al., 2007b,c). Para além disso, uma primeira avaliação ecotoxicológica baseada na realização de ensaios padronizados de toxicidade aguda com *Daphnia magna* mostrou uma percentagem muito baixa de mortalidade, indicando um baixo potencial de toxicidade aguda para esta água subterrânea (Guimarães et al., 2006; Costa Cruz, 2007; Afonso et al., 2007b,c). Estudos posteriores, de avaliação sazonal, confirmaram estes resultados, mostrando que a mortalidade obtida em ensaios agudos com *D. magna* é semelhante ao longo de todo o ano (L. Guimarães, comun. oral). Os resultados destas avaliações, levantaram também a necessidade de estudo das potenciais fontes de contaminação deste manancial. Um inventário de potenciais fontes de contaminação realizado para o efeito (Seabra, 2006; Costa Cruz, 2007; Afonso et al., 2007b,c; Guimarães et al., 2008; Afonso, *in prep.*) veio mostrar uma predominância de fontes de contaminação pontuais, embora também se tenham encontrado fontes difusas e lineares. As potenciais fontes de contaminação encontradas incluem, entre outras, a presença de campos agrícolas no percurso à superfície do traçado subterrâneo do manancial, de várias unidades ou postos de cuidados de saúde humana (*e.g.*, hospitais, clínicas, centros de saúde), de várias bombas de abastecimento de combustíveis, instalações militares e algumas fábricas industriais. O inventário indicou ainda que os maiores problemas de poluição nesta área estão associados a fugas de depósitos subterrâneos de combustíveis, escoamento urbano (concentrado ao longo das estradas e ruas principais) de oficinas mecânicas, poços de ventilação e casas de banho públicas (Afonso et al., 2007b,c).

Embora os ensaios de ecotoxicidade realizados nos trabalhos prévios não tenham detectado efeitos letais, não se pode, contudo, excluir a possibilidade de esta água apresentar contaminação capaz de induzir efeitos tóxicos sub-letais, resultantes da mistura complexa de

contaminantes que a compõem. Esta hipótese é reforçada pelos resultados quer das análises hidrogeoquímicas quer do levantamento e mapeamento de potenciais fontes de contaminação já referidos.

5.3. Objectivos

O caso de estudo desenvolvido nesta parte do trabalho teve por objectivo a utilização da AChE de *D. magna*, como biomarcador de neurotoxicidade, para o estudo de efeitos subletais da água do manancial de Paranhos. Pretendeu-se contribuir para a eventual confirmação do baixo potencial tóxico desta água subterrânea, e a sua possível adequabilidade para actividades de rega de jardins públicos e lavagem de ruas, actualmente feitas na cidade do Porto com água de qualidade superior. A possibilidade de utilização desta grande quantidade de água, disponível na cidade, para a rega e lavagem permitiria uma poupança de água potável fundamental para consumo humano que actualmente se encontra em escassez.

A abordagem utilizada foi a da realização de ensaios de toxicidade aguda com o microcrustáceo *Daphnia magna* baseados na determinação da AChE. Foi escolhida a actividade desta enzima pelo papel fundamental que desempenha nos mecanismos de neurotransmissão, e pela sua sensibilidade a uma vasta gama de compostos que inclui os pesticidas organofosforados e carbamatos, alguns metais, detergentes e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, todos eles

potenciais contaminantes desta água conforme indicado pelos trabalhos prévios desenvolvidos nesta área por outros autores.

5.4. Material e métodos

Considerações iniciais

Para estudo dos efeitos da água do Manancial de Paranhos na actividade da AChE de *Daphnia magna* foram realizados ensaios agudos baseados neste biomarcador. Os ensaios foram feitos com água colhida em seis locais de amostragem distribuídos ao longo dos 3 Km de percurso transitável deste manancial. Os locais de amostragem foram criteriosamente seleccionados em função dos resultados de análises hidrogeoquímicas e ecotoxicológicas, e do inventário de fontes de contaminação, obtidos por outros autores em trabalhos prévios de avaliação da qualidade desta água (ver referências em Afonso et al., 2007b,c). Descreve-se em seguida a metodologia seguida tanto na realização dos ensaios baseados na AChE apresentados neste trabalho, como na determinação da actividade desta enzima a partir das amostras obtidas nos ensaios. Todos os testes foram efectuados no Laboratório de Ecotoxicologia do CIIMAR, sob a coordenação da Doutora L. Guimarães e da Prof. Doutora L. Guilhermino.

Organismos teste

Nos bioensaios efectuados utilizaram-se juvenis de *Daphnia magna*, nascidos da 3ª à 5ª ninhadas e com idade compreendida entre 6 e 24 horas, do clone A (*sensu* Baird et al. 1989a) provenientes de fêmeas progenitoras mantidas em culturas individuais no Laboratório de Ecotoxicologia do CIIMAR.

Daphnia magna (figura 27) é um microcrustáceo de água doce, vulgarmente designado por pulga-de-água (visto que se movimenta através dos movimentos das segundas antenas aparentando deslocar-se em pequenos saltos), que pertence à ordem dos Cladóceros. Este organismo apresenta, como todos os crustáceos, uma carapaça que pode sofrer muda diária.

Este é um organismo de eleição, muito utilizado em Ecotoxicologia Aquática, por possuir as características que lhe conferem relevância ecológica e vantagens práticas, que a seguir se indicam (Cooney, 1995). É representativo dos consumidores primários numa cadeia alimentar, uma vez que converte fitoplâncton em proteínas animais e serve de alimento a uma grande

variedade de espécies de peixe. É um habitante comum das águas doces dos cinco continentes, apresentando uma ampla distribuição geográfica. É facilmente cultivável em laboratório, requerendo pouco espaço, relativamente aos peixes, por exemplo, e tornando por isso os testes mais económicos. As fêmeas progenitoras originam grande número de descendentes num curto espaço de tempo, devido à sua capacidade de reprodução assexuada. Em laboratório, onde as condições ambientais são favoráveis e constantes, *D. magna* reproduz-se apenas por reprodução assexuada (partenogénese) originando numerosos descendentes geneticamente idênticos às fêmeas progenitoras o que permite eliminar a variabilidade de ordem genética dos bioensaios. Embora a duração do ciclo de vida de *D. magna*, do ovo à vida adulta, dependa das condições ambientais a que esta está sujeita, apresenta um ciclo de vida curto relativamente, por exemplo, a espécies de peixes. O seu ciclo de vida varia entre, cerca de 40 dias a 25 °C, e 56 dias a 20°C. Quando mantida em laboratório, esta espécie tem, normalmente, juvenis de 3 em 3 dias e precisa de 7 a 10 dias para dar origem à primeira ninhada. Os ovos são libertados do ovário para o marsúpio (figura 27) onde se desenvolvem em juvenis que são, por sua vez, libertados para o ambiente quando as progenitoras mudam a sua carapaça. Para além disso, *D. magna* é sensível a uma vasta gama de tóxicos.

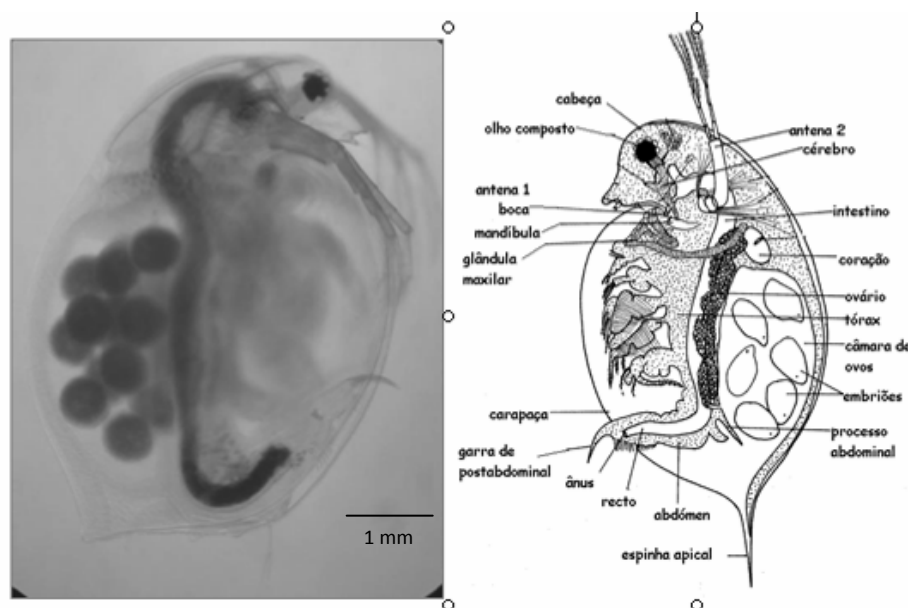


Figura 27 - Fotografia obtida à lupa (esquerda) e representação esquemática da anatomia (direita) de *Daphnia magna* (adaptado de Cooney, 1995).

Pelos aspectos mencionados, os ensaios com esta espécie são formalmente reconhecidos por organizações internacionais, sendo requeridos para a avaliação do impacto potencial no ambiente aquático de efluentes ou de novos compostos químicos (EPA, 1993; OCDE, 2000).

Nas culturas individuais, cada fêmea progenitora era mantida em 100 mL de meio água dura ASTM (ASTM, 1980) suplementado com um aditivo orgânico preparado a partir de um extracto concentrado de *Ascomyces nodosum* (Baird et al., 1989b). Os animais eram alimentados diariamente com uma suspensão da microalga de água doce *Chlorella vulgaris*, também mantida em cultura no Laboratório de Ecotoxicologia, numa quantidade adequada ao fornecimento de 0.322 mg de carbono por dia. As culturas eram mantidas em sala climatizada com um fotoperíodo de 16 h luz: 8 h escuro, e a uma temperatura de 20 ± 1 °C.

Metodologia geral dos ensaios com *D. magna* baseados no biomarcador AChE

Os ensaios, realizados no Laboratório de Ecotoxicologia do CIIMAR, foram elaborados de acordo com as directivas da OCDE (OCDE, 2000) para ensaios padronizados de toxicidade aguda e conforme descrito em Guilhermino (1996), com ligeiras adaptações. Para cada concentração testada foram expostos 30 animais, em grupos de 6 por 100 mL de solução teste (figura 28). O meio de teste utilizado para a concentração controlo foi o água dura ASTM, sem vitaminas e sem suplemento orgânico. Cada ensaio realizado teve a duração de 48 horas. Os animais não foram alimentados durante o período de duração dos ensaios. Às 0, 24 e 48 horas registou-se a mortalidade observada em cada réplica dos ensaios. A morte foi reconhecida através da imobilização durante mais de 15 segundos sob exposição a um estímulo luminoso. Às 0, 24 e 48 horas foram também efectuadas medições dos seguintes parâmetros físico-químicos: concentração de oxigénio dissolvido na água, temperatura, pH e condutividade. Os ensaios decorreram nas mesmas condições de fotoperíodo e temperatura indicadas para a manutenção das culturas laboratoriais.

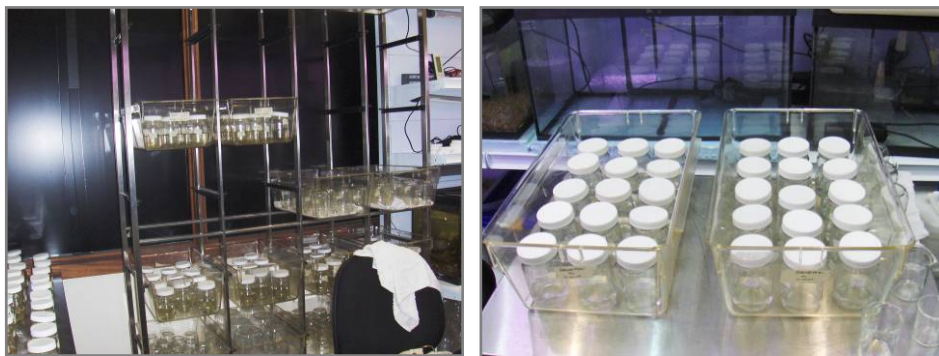


Figura 28 - Bioensaio de toxicidade com *Daphnia magna* baseado na AChE para avaliação de efeitos subletais da água subterrânea do Manancial de Paranhos.

Preparação das soluções-teste

Em cada ensaio realizado testaram-se seis concentrações diferentes da água colhida em cada ponto de amostragem: 0.0% (controlo), 12.5%, 25%, 50%, 75% e 100%. Estas concentrações foram preparadas por diluições sucessivas da água colhida em cada local de amostragem com o meio de teste água dura ASTM. Para um ponto de amostragem em que o pH da água colhida era naturalmente inferior a 6, procedeu-se ao seu ajuste por adição de algumas gotas de uma solução de NaOH (5N), por este valor se encontrar abaixo do intervalo adequado à sobrevivência de *D. magna* (Peters, 1987) (figura 29). A água subterrânea com o pH assim ajustado foi em seguida utilizada para a preparação das soluções teste.

Preparação de homogeneizados

Quarenta e oito horas após o início dos ensaios, os juvenis vivos foram utilizados para preparar homogeneizados para a determinação da actividade da AChE. Para o efeito os juvenis foram isolados para microtubos de 2 mL (figura 30), na proporção de 30 juvenis para 0.5 mL de tampão fosfato (0.1M pH 7.2), e homogeneizados durante 60 segundos num homogeneizador Ystral GmbH Dottingen®, tendo sido mantidas em gelo durante a homogeneização para evitar a desnaturação das enzimas (Guilhermino et al., 1996). Os homogeneizados obtidos foram conservados a -80 °C, por um período não superior a 15 dias, até determinação da actividade da AChE.



Figura 29 - Ajuste de pH para preparação de soluções teste a usar num bioensaio.



Figura 30 - Preparação de homogeneizados para determinação da AChE.

Determinação da actividade da AChE

Ensaio enzimático

A determinação da actividade da AChE tem como princípio do método a hidrólise da acetiltiocolina (composto semelhante à acetilcolina fornecido como substrato para a reacção) em ião acetato e tiocolina pela AChE; a tiocolina assim produzida reage com o ácido 5,5-ditio-bis(2)-nitrobenzóico (DTNB) originando um composto de cor amarela (ácido 5-tio-2-nitro-benzóico com um coeficiente de extinção molar, $\epsilon = 1,36 \times 10^4 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$) (figura 31). A actividade da enzima é medida através do aumento da produção desse composto de cor amarela, durante 5 minutos num espectrofotómetro, a um comprimento de onda de 412 nm, e a uma temperatura constante de 25°C (Guilhermino et al., 1996a,b). Seguiu-se o método espectrofotométrico de Ellman (Ellman et al., 1961) adaptado a microplaca (Guilhermino et al., 1996).

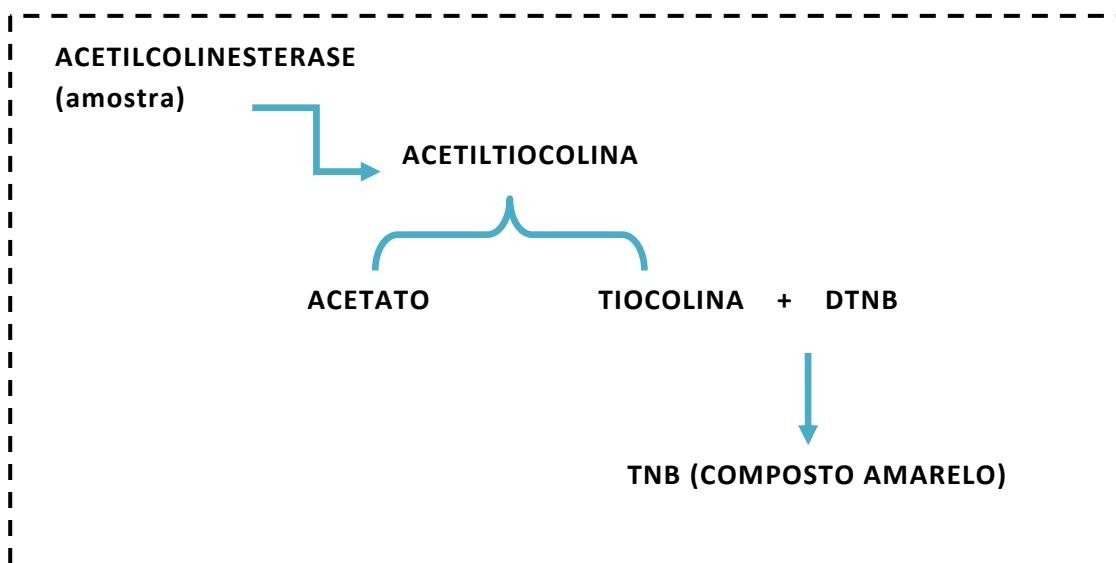


Figura 31 - Representação esquemática do princípio do método de determinação da actividade da AChE.

DTNB, ácido 5,5-ditio-bis(2)-nitrobenzóico; TNB, ácido 5-tio-2-nitro-benzóico.

A solução de reacção, preparada na altura do ensaio enzimático, consiste em 30 mL de tampão fosfato (0.1 M pH 7.2) aos quais se adicionaram 0,2 mL de acetiltiocolina (0.075 M) e 1 mL de solução de DTNB (10 mM). As soluções de acetiltiocolina e DTNB foram previamente preparadas e armazenadas a 4°C, protegidas da luz, durante um período máximo de uma semana.

Em cada ensaio bioquímico realizado adicionaram-se a 0.100 mL dos homogeneizados previamente obtidos 0.250 mL de solução de reacção. Foram efectuadas 4 determinações por amostra e a solução de reacção foi usada como branco. A absorvância foi lida num espectrofotómetro de microplacas BIOTEK[®] power wave 340, a 412 nm, durante 5 minutos, após um período de incubação de 10 minutos. A actividade da enzima foi expressa em nanomoles de substrato hidrolisado por minuto por mg de proteína.

Determinação da concentração de proteína nas amostras

Para a determinação, feita em triplicado, da concentração de proteína na amostra foi usado o método de Bradford (Bradford et al., 1980) adaptado a microplaca (Guilhermino et al., 1996a). Para o efeito, foram preparados padrões a partir de uma solução reserva de proteína de γ -globulinas de bovino (0.5 mg/mL), que pode ser previamente preparada e mantida a -20°C. Os padrões foram construídos de acordo com a Quadro 15; na mesma tabela indica-se a quantidade de amostra utilizada por réplica. A solução de Bio-Rad foi obtida por diluição deste reagente em

água ultra-pura numa proporção de 6:24. A absorvância foi lida num espectrofotómetro de microplacas BIOTEK[®] power wave 340, a 600 nm após um período de incubação de 15 minutos.

Quadro15 - Preparação de padrões e amostras para a determinação da concentração de proteína.

	Padrão 0	Padrão 1	Padrão 2	Padrão 3	Amostra
Água ultra-pura (mL)	0.010	0.008	0.005	0.000	0.000
Solução padrão de proteína (mL)	0.000	0.002	0.005	0.010	0.000
Amostra (mL)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.020
Solução de Bio-Rad (mL)	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250

Cálculo da actividade da AChE

A actividade da AChE (nanomol de substrato hidrolisado por minuto por mg de proteína) é calculada de acordo com a expressão seguinte:

$$\frac{1}{(13.6 \cdot 0.9) (VA / VT)} \times \frac{DO}{\text{proteína amostra (mg/ml)}}$$

Em que:

DO – declive calculado a partir das leituras de absorvância efectuadas ao longo dos 5 minutos;

13.6 – coeficiente de absorvidade molar do DTNB já corrigido para a actividade final vir em nmol/min/mg proteína;

0.9 – distância (altura) da microplaca a ser atravessada pelo feixe luminoso do espectrofotómetro (cm);

VA – volume da amostra utilizado no ensaio enzimático (no poço da microplaca) (0.100 mL);

VT – volume total (no poço da microplaca) (0.350 mL);

Proteína da amostra – média dos 3 ou 4 poços (réplicas) de cada amostra estimada para o volume de amostra usado no ensaio enzimático, expressa em mg/L.

Análise dos resultados

Os resultados obtidos nos bioensaios realizados são apresentados graficamente sob a forma de percentagem de sobreviventes por ensaio e por concentração de água subterrânea testada. Apresentam-se sob a forma de médias e respectivos desvios padrão, os valores dos parâmetros físico-químicos registados ao longo dos ensaios realizados. Os valores de actividade da AChE determinada nos juvenis de *D. magna* expostos à água subterrânea do manancial de Paranhos são apresentados sob a forma de média e desvio padrão, em nmol/min/mg de proteína, e graficamente em percentagem de inibição relativamente à actividade obtida para os controlos.

5.5. Resultados

Apresentam-se neste capítulo os resultados dos bioensaios efectuados para estudo de efeitos da água subterrânea do Manancial de Paranhos na actividade da AChE de *D. magna*, nomeadamente relativos à mortalidade observada, aos parâmetros físico-químicos medidos durante os ensaios, e à determinação da actividade da AChE.

5.5.1. Sobrevivência

Na figura 32 apresentam-se os resultados dos seis ensaios de toxicidade efectuados. Os valores representam a percentagem de sobrevivência observada para juvenis de *Daphnia magna* expostos a concentrações crescentes de água subterrânea do Manancial de Paranhos ao fim das 24 e 48 horas de duração dos ensaios.

A análise dos resultados mostra que a mortalidade registada foi ocasional. Relativamente ao grupo controlo, foi registada mortalidade nos ensaios 2, 4 e 6, nunca superior a 10%, sobretudo ao fim das 48 horas de duração dos ensaios. A mortalidade registada nas diferentes concentrações de água subterrânea testada foi bastante baixa, sempre inferior a 10%, ocorrendo sobretudo nos ensaios 4 e 6, após 48 horas de exposição. Os resultados obtidos não permitem estimar valores de CL50 (concentração de água subterrânea testada que provoca a morte de 50% dos organismos testados, nas condições experimentais utilizadas). para nenhum dos ensaios realizados.

5.5.2. Parâmetros físico-químicos

Os parâmetros físico-químicos registados ao longo das 48 horas de exposição à água subterrânea amostrada são apresentados para cada um dos ensaios efectuados nos quadros 16 a 21 Os valores representam as médias e o desvio padrão, para cada concentração testada, de pH, temperatura, oxigénio dissolvido e condutividade.

A análise dos quadros mostra os parâmetros físico-químicos medidos se mantiveram constantes ao longo de cada ensaio realizado. Nos ensaios 2, 4 e 6 a temperatura das soluções teste ao longo do ensaio foi de aproximadamente 20°C, enquanto que nos ensaios 1, 3 e 5 foi de 21°C. Em nenhum dos ensaios se verificou uma variação de temperatura superior a 1 unidade ao longo do período de teste. O pH das soluções teste foi de aproximadamente 8.0. Em todos os ensaios efectuados a variação de pH observada foi inferior a 1 unidade. A concentração em

oxigénio dissolvido registada nos diferentes ensaios variou entre um mínimo de 87% e um máximo de 98%.

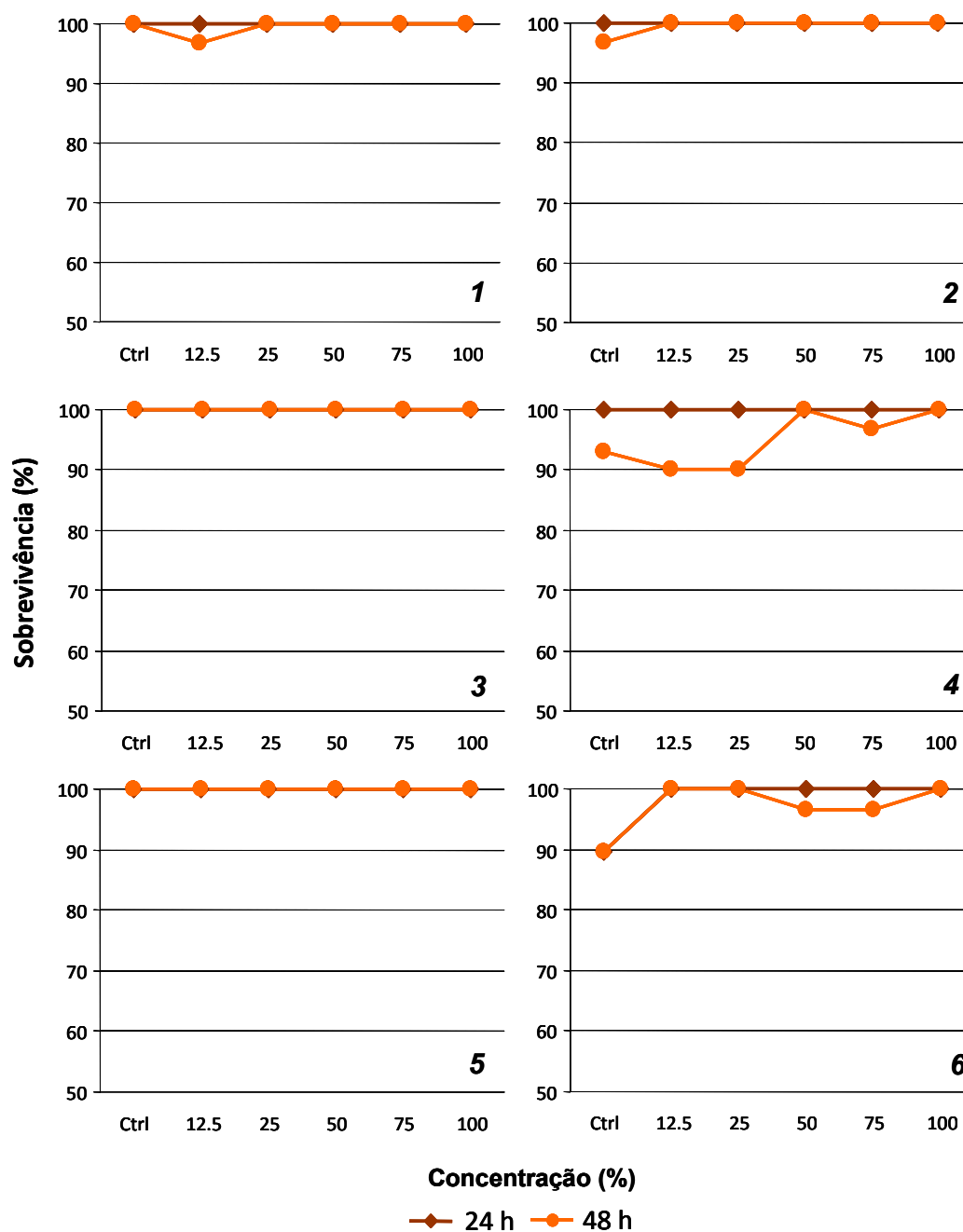


Figura 32 - Sobrevivência às 24 e 48 horas de juvenis de *D. magna* em função da concentração de água subterrânea testada nos seis (1-6) ensaios de toxicidade aguda efectuados.

A condutividade registada nas diferentes soluções teste variou entre um mínimo de 335 ± 16.4 , registado para a concentração de 75% no ensaio realizado com água colhida no ponto de amostragem 5, e um máximo de 562 ± 34.2 no grupo controlo do ensaio realizado com a água colhida no ponto de amostragem 6. Os valores de condutividade obtidos para o meio água dura

ASTM (recipientes controlo) e as diferentes amostras de água subterrânea colhidas, foram regra geral, bastante semelhantes. Exceptuam-se as concentrações de 50 a 100% registadas no ensaio do ponto 5 que foram em média cerca de 30% inferiores às registadas nas concentrações de 0 a 25% do mesmo ensaio.

Quadro 16 - Valores médios e respectivos desvios padrão obtidos para os parâmetros físico-químicos do ensaio de toxicidade realizado com a água subterrânea recolhida no ponto 1. OD, oxigénio dissolvido; Cond, condutividade.

Parâmetros	Concentrações					
	CTRL	12,5%	25%	50%	75%	100%
OD (%)	97,2±2,43	98,0±0,98	95,6±1,66	96,5±2,05	97,0±0,67	94,2±3,46
pH	7,8±0,31	8,1±0,07	8,1±0,05	8,1±0,02	8,1±0,09	8,1±0,07
Temperatura (°C)	21,0±0,52	21,1±0,42	21,0±0,47	21,0±0,44	20,9±0,46	20,9±0,45
Cond (µS/cm)	469±52,5	464±58,2	498±45,0	506±34,7	461±62,5	504±41,0

Quadro 17 - Valores médios e respectivos desvios padrão obtidos para os parâmetros físico-químicos do ensaio de toxicidade realizado com a água subterrânea recolhida no ponto 2. OD, oxigénio dissolvido; Cond, condutividade.

Parâmetros	Concentrações					
	CTRL	12,5%	25%	50%	75%	100%
OD (%)	91,7±1,72	91,0±1,06	90,0±1,32	90,6±1,43	90,1±2,14	89,8±2,63
pH	8,3±0,06	8,2±0,13	7,9±0,31	7,9±0,28	7,7±0,41	7,6±0,35
Temperatura (°C)	20,3±0,36	20,4±0,33	20,4±0,32	20,4±0,27	20,3±0,42	20,4±0,35
Cond (µS/cm)	464±24,5	446±28,4	423±26,58	401±26,9	459±20,2	381±17,5

Quadro 18 - Valores médios e respectivos desvios padrão obtidos para os parâmetros físico-químicos do ensaio de toxicidade realizado com a água subterrânea recolhida no ponto 3. OD, oxigênio dissolvido; Cond, condutividade.

Parâmetros	Concentrações					
	CTRL	12,5%	25%	50%	75%	100%
OD (%)	93,1±2,48	93,1±1,68	92,3±3,42	92,9±1,91	89,5±5,28	91,6±5,25
pH	8,2±0,04	8,2±0,06	8,1±0,10	8,1±0,09	8,0±0,12	8,0±0,11
Temperatura (°C)	21,3±0,38	21,3±0,45	21,2±0,44	21,2±0,36	20,9±0,51	21,0±0,32
Cond (µS/cm)	489±34,6	480±42,4	503±24,5	484±43,1	467±44,0	486±52,4

Quadro 19 - Valores médios e respectivos desvios padrão obtidos para os parâmetros físico-químicos do ensaio de toxicidade realizado com a água subterrânea recolhida no ponto 4. OD, oxigênio dissolvido; Cond, condutividade.

Parâmetros	Concentrações					
	CTRL	12,5%	25%	50%	75%	100%
OD (%)	97,2±2,43	98,0±0,98	95,6±1,66	96,5±2,05	97,0±0,67	94,2±3,46
pH	7,9±0,31	8,1±0,07	8,1±0,05	8,1±0,02	8,1±0,09	8,1±0,07
Temperatura (°C)	20,3±0,30	20,1±0,43	20,1±0,14	20,1±0,30	20,1±0,59	20,4±0,25
Cond (µS/cm)	469±52,5	464±58,2	498±45,0	506±34,7	461±62,5	504±41,0

Quadro 20 - Valores médios e respectivos desvios padrão obtidos para os parâmetros físico-químicos do ensaio de toxicidade realizado com a água subterrânea recolhida no ponto 5. OD, oxigênio dissolvido; Cond, condutividade.

Parâmetros	Concentrações					
	CTRL	12,5%	25%	50%	75%	100%
OD (%)	91,3±1,56	90,5±1,34	89,5±1,90	89,2±1,84	89,4±2,08	89,4±1,70
pH	8,2±0,04	8,2±0,03	8,1±0,08	8,1±0,05	8,0±0,06	7,9±0,11
Temperatura (°C)	21,4±0,40	21,4±0,44	21,5±0,33	20,4±0,27	21,3±0,29	21,4±0,27
Cond (μS/cm)	497±22,9	455±34,5	465±63,0	364±19,4	335±16,4	297±28,2

Quadro 21 - Valores médios e respectivos desvios padrão obtidos para os parâmetros físico-químicos do ensaio de toxicidade realizado com a água subterrânea recolhida no ponto 6. OD, oxigênio dissolvido; Cond, condutividade.

Parâmetros	Concentrações					
	CTRL	12,5%	25%	50%	75%	100%
OD (%)	95,3±1,56	93,6±1,34	87,4±1,90	90,2±1,84	93,7±2,08	91,4±1,70
pH	8,3±0,01	8,2±0,04	8,2±0,06	8,1±0,06	8,0±0,01	7,9±0,02
Temperatura (°C)	20,3±0,03	20,1±0,04	20,1±0,01	20,1±0,02	20,1±0,069	20,1±0,03
Cond (μS/cm)	562±34,2	556±47,1	552±21,0	546±27,1	538±56,8	523±48,7

5.5.3. Actividade da AChE de *Daphnia magna*

Na figura 33 está representada a actividade da ACHE, em percentagem da actividade dos controlos, determinada em juvenis de *D. magna* expostos a concentrações crescentes de água subterrânea do Manancial de Paranhos nos bioensaios realizados.

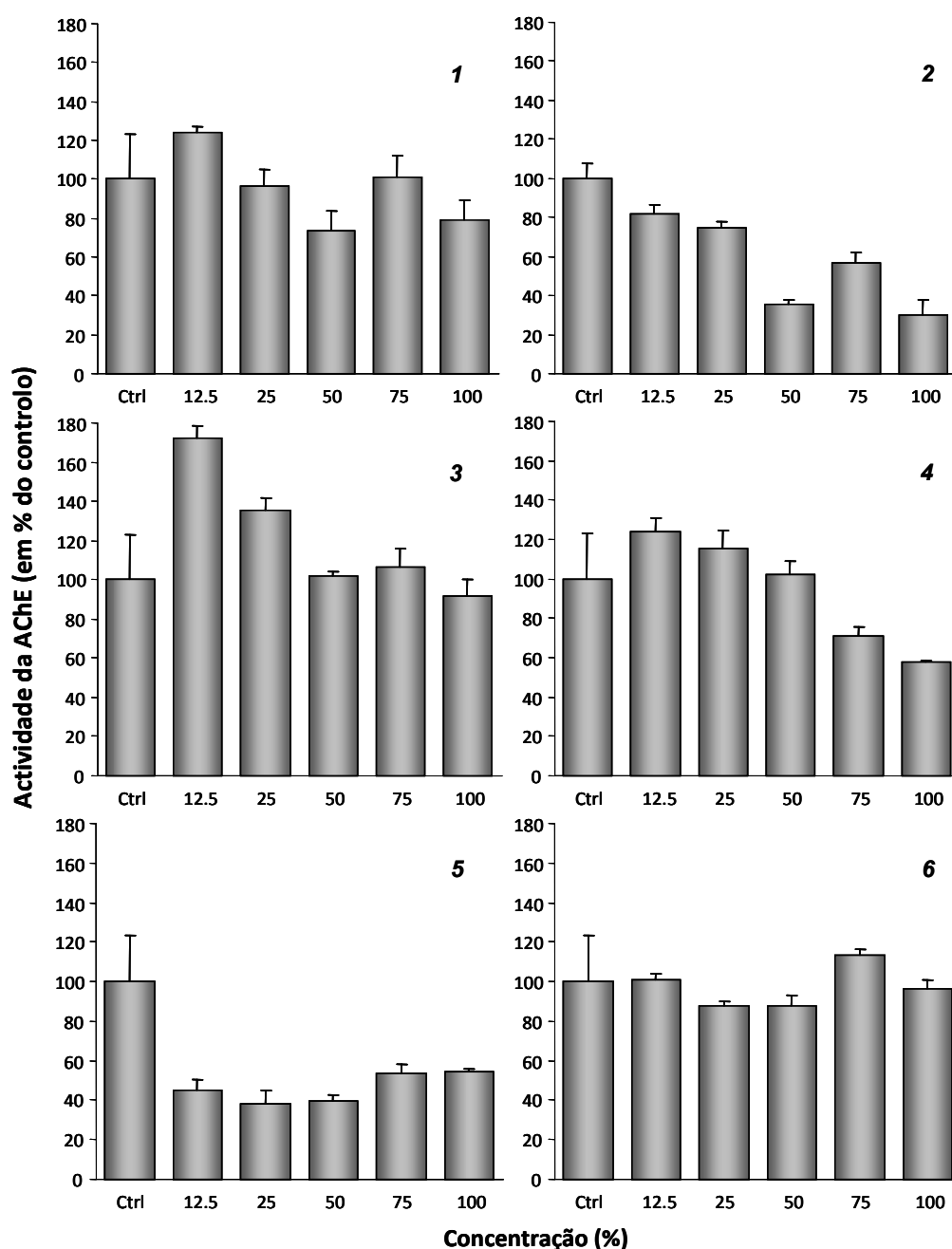


Figura 33 - Actividade da AChE (em percentagem da actividade dos controlos), determinada em juvenis de *D. magna*, em função da concentração de água subterrânea do manancial de Paranhos colhida nos seis (1-6) pontos de amostragem.

A actividade média da AChE determinada nos seis grupos controlo (um por ensaio) foi de 10.2 ± 2.36 nmol/min/mg de proteína.

A análise dos resultados apresentados na figura 33 mostra uma diminuição da actividade da AChE de 36% e 30% nas concentrações, respectivamente, de 75 e 100% de água subterrânea colhida no ponto 2, relativamente ao grupo controlo. Relativamente ao ensaio efectuado com a amostra colhida no local 4 observou-se uma inibição da actividade da AChE de 30% e 40% após exposição dos juvenis de *D. magna* às concentrações, respectivamente, de 75% e 100%, relativamente ao grupo controlo. No ensaio realizado com a água colhida no ponto de amostragem 5, verificou-se uma inibição entre 45% a 60% da actividade da AChE em todas as concentrações testadas, relativamente ao grupo controlo.

Nos ensaios realizados com a água colhida nos pontos de amostragem 1, 3 e 6, não parece haver diferenças relevantes na actividade da AChE observada nas diferentes concentrações testadas, com excepção da concentração de 12.5% do ensaio efectuado no local 3. Neste ensaio observou-se um aumento de 72% na actividade da AChE após exposição dos juvenis a uma concentração de 12.5% da água subterrânea colhida naquele local, relativamente ao grupo controlo.

5.6. Discussão

No caso de estudo sobre a água subterrânea do Manancial de Paranhos procedeu-se à investigação de efeitos ecotoxicológicos subletais causados pela exposição a esta água em *Daphnia magna*, através da realização de bioensaios de toxicidade aguda baseados na actividade da enzima acetilcolinesterase como biomarcador de neurotoxicidade. Os ensaios foram elaborados com água colhida em seis pontos de amostragem criteriosamente distribuídos ao longo do percurso do Manancial.

Os resultados obtidos mostraram que os parâmetros físico-químicos medidos se mantiveram constantes ao longo do período de duração dos diferentes ensaios realizados e dentro dos valores recomendados pelas normas de padronização propostas pela OCDE (2000), nomeadamente uma variação não superior a uma unidade para a temperatura e o pH, e uma concentração de oxigénio dissolvido superior a 60%. Assim, os ensaios efectuados podem ser considerados válidos sob este aspecto.

A mortalidade observada nos grupos controlo foi sempre inferior a 10%, pelo que os ensaios podem também ser considerados válidos sob este aspecto. Nas concentrações de água

subterrânea testada nos diferentes ensaios a mortalidade observada foi ocasional, nunca superior a 10%, não permitindo mesmo estimar valores de CL50. Estes resultados confirmam o baixo potencial de toxicidade aguda desta água subterrânea para *Daphnia magna*, anteriormente descritos (Guimarães et al., 2006; Afonso et al., 2007b,c; Guimarães et al., 2008).

O valor médio de actividade da AChE para os grupos controlos está próximo do obtido por outros autores num estudo da inibição da AChE como critério de efeito em ensaios agudos com juvenis de *D. magna* (Guilhermino et al., 1996a).

Uma vez que percentagens de inibição da actividade da AChE superiores a 20% são consideradas como indicativas da exposição a agentes anticolinesterásicos (Ludke et al., 1975), os resultados da determinação da actividade da AChE efectuada com as amostras recolhidas nos pontos de amostragem 2, 4 e 5 parecem sugerir a presença de contaminantes com função anticolinesterásica na água amostrada nestes locais, que podem originar défices dos sistemas nervoso e neuromuscular. Efectivamente estes locais de amostragem situam-se próximo a jardins e casas de banhos públicas, poços de ventilação e instalações militares (Casão militar) e de cuidados de saúde (Hospital da Lapa, por exemplo). A actividade da AChE que foi inicialmente considerada um biomarcador de exposição e efeito específico para pesticidas organofosforados e carbamatos (Galgani et al., 1992), é efectivamente inibida por outros contaminantes ambientais, comumente encontrados nos resíduos provenientes das actividades acima mencionadas, incluindo metais, combustíveis vários, detergentes e misturas complexas de poluentes (Payne et al., 1996; Guilhermino et al., 1998).

Apesar da proximidade dos pontos 2, 4 e 5 de algumas potenciais fontes de contaminação, não se observou uma inibição relevante da actividade da AChE nos ensaios realizados com a água colhida neste pontos. A indução da AChE observada para a concentração de 12.5% da água amostrada no ponto 3 pode ser interpretada como um fenómeno de *hormesis*, i.e., um efeito estimulante ocorrido em resposta à exposição a concentrações baixas de um agente que provocar efeitos nocivos a concentrações de exposição mais elevadas.

Os resultados anteriores sugerem que pelo menos parte desta água poderá ser utilizada com segurança para fins de irrigação e lavagem das vias públicas. Contudo apenas foi realizado um ensaio em cada um dos pontos amostrados. Por esta razão, estes resultados devem ser analisados com precaução e confirmados com a realização de outros ensaios com água amostrada nos mesmo locais, pelo menos 3 réplicas/ensaios por local amostrado. Será também interessante verificar se estes resultados se verificam ao longo da totalidade do percurso desta água subterrânea, através do estudo de um maior número de locais distribuídos desde a zona da

nascente até à Fonte da Oliveiras, e relacionar os resultados obtidos com potenciais fontes de contaminação presentes nessas áreas. Em conclusão, o estudo ecotoxicológico da água subterrânea do Manancial de Paranhos através da realização de ensaios baseados no biomarcador AChE fornece uma forma de avaliação dos efeitos ambientais desta mistura complexa de resultante de diferentes fontes de contaminação. A figura 34 apresenta a implantação dos pontos de amostragem estudados na cartografia das fontes de contaminação na área envolvente ao traçado do túnel de Paranhos.

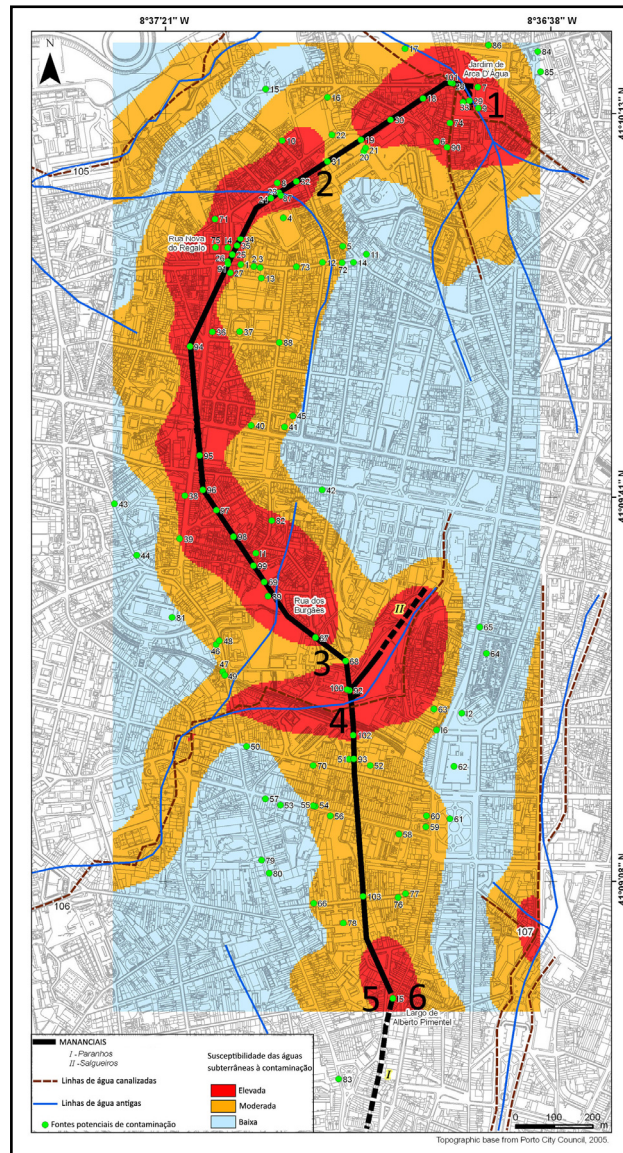


Figura 34 - Localização dos pontos de amostragem na cartografia de fontes de contaminação (segundo Afonso et al., 2007c).

5.7. Análise de custos

O tipo de trabalho multidisciplinar desenvolvido no presente estudo pode ser enquadrado em qualquer tipo de projecto aplicado. Os principais elementos do trabalho a analisar a nível da geologia fundamental e aplicada, à escala regional e local, surgiram da recolha de bibliografia diversa, recorrendo-se à caracterização do local através de critérios geológicos e morfoestruturais. Foi executada um reconhecimento hidrogeológico do qual fez parte integrante um inventário hidrogeológico local de todos os pontos de água superficial e subterrânea (nascente do Poço Quente). Seguindo-se a representação e tratamento dos dados fornecidos por essa inventariação. Com o objectivo de avaliar o potencial tóxico das águas subterrâneas do Manancial de Paranhos, foi efectuado um estudo ecotoxicológico preliminar, durante um estágio de curta-duração. Por fim procedeu-se a um relatório final, onde foram redigidos todos os conhecimentos e documentação adquiridos de forma a se poder realizar este projecto.

No quadro 22 indica-se o faseamento, em trimestres, do estudo realizado com uma estimativa, em termos de custos, para a execução deste trabalho com o estatuto de técnico júnior e assumindo que são fornecidos os equipamentos de base para o desenvolvimento dos estudos geológicos, hidrogeológicos/ecotoxicológicos e geofísicos. Assim, no estudo multitécnico poderíamos apontar, segundo as recomendações em termos de honorários, quer da Ordem dos Engenheiros, quer da Associação Portuguesa de Geólogos, como um orçamento base de 12.000 Euros (s/ IVA) e com um prazo de execução de 9 meses.

Quadro 22 - Diversas fases constituintes do trabalho e respectivos custos associados ao Projecto.

TRIMESTRE		1º	2º	3º	Custos (€)
Recolha de bibliografia	Regional / especialidade	*			250
Geologia Aplicada/Geotecnia	Reconhecimento de campo	*			250
Hidrogeologia/Ecotoxicologia	Levantamento hidrogeológico	*			4000
	Ensaios ecotoxicológicos	*	*		
	Tratamento dos dados		*	*	
Geofísica aplicada	Levantamento de campo	*	*		4000
	Tratamento de dados		*	*	
Estudos complementares	Vectorização de mapas SIG		*	*	2500
Relatório final	Redacção do relatório técnico-científico (despesas gerais)			*	1000
Total (sem IVA)					12.000

6

CONCLUSÕES

6. CONCLUSÕES

Esta dissertação apresenta, numa aproximação multidisciplinar, uma combinação multitécnica das ferramentas hidrogeológicas, hidrogeofísicas e ecotoxicológicas. Esta metodologia foi extremamente valiosa no conhecimento dos recursos hidrominerais e nos sistemas de água subterrânea em meio urbano. Além disso, poderá ser um bom instrumento para o planeamento e a gestão dos recursos hídricos subterrâneos de uma forma sustentável.

O estudo hidrogeofísico da área da nascente termal do Poço Quente (Peso da Régua), envolveu, numa primeira fase um reconhecimento geológico da área no sentido de apoiar e decidir qual a abordagem hidrogeofísica mais adequada para o local e, numa fase posterior, a cartografia aplicada, ensaios geofísicos (método electromagnético), ensaios esclerométricos e um inventário dos diversos pontos de água. Esta abordagem teve como objectivo principal a apresentação duma nova contribuição em termos da geofísica aplicada no refinamento do modelo hidrogeológico conceptual associado às águas termominerais do Poço Quente, bem como delinear futuras potencialidades deste georrecurso em termos do seu potencial geotérmico de baixa entalpia. A partir da execução dos perfis electromagnéticos poderemos apontar as seguintes aspectos conclusivos: i) pela análise dos perfis e do mapeamento geofísico, além do cruzamento com a geologia da área do Poço Quente, poder-se-á definir um alinhamento geoeléctrico com orientação média WNW-ESE e a anomalia geoeléctrica NNW-ESE poderá materializar um corpo granítico (este poderá corresponder ao granito de Cidadelhe ou a um filão pegmatítico) em profundidade; ii) o meio prospectado, na sua globalidade, apresenta variabilidade no parâmetro condutividade eléctrica em profundidade. Assim, dever-se-ia prosseguir este estudo com métodos geofísicos com uma maior penetração. Porém, esta abordagem preliminar apoia inequivocamente o modelo hidrogeológico conceptual defendido por Espinha Marques et al. (2001a,b, 2003) para a área.

Foram ainda realizados estudos hidrogeológicos e ecotoxicológicos ao longo e na área envolvente das galerias subterrâneas, com cerca de 3 km, correspondentes ao antigo manancial de Paranhos (também conhecido como manancial da Arca d'Água), o qual constituiu, durante mais de cinco séculos, uma das principais fontes de abastecimento de água à cidade do Porto. Os resultados obtidos neste trabalho sugerem que as águas subterrâneas da cidade do Porto são adequadas para a irrigação. Investigações complementares concluíram que a susceptibilidade à contaminação mais elevada incide nas imediações do traçado do túnel (evidência talvez explicada pelo facto de a própria galeria subterrânea constituir só por si uma influente fonte de transporte de contaminantes) e estão associadas fundamentalmente a oficinas de automóveis e a poços de

ventilação. Relativamente à presença de nitratos e de sulfatos nas águas subterrâneas da cidade do porto pode-se supor que a sua origem está intimamente associada à infiltração de água das fossas sépticas, às descargas de esgotos domésticos e efluentes industriais. Estes resultados são provavelmente indícios da intensa urbanização e de algumas práticas agrícolas. O estudo ecotoxicológico da água subterrânea do Manancial de Paranhos fornece através da realização de ensaios baseados no biomarcador AChE uma forma de avaliação dos efeitos ambientais desta mistura complexa resultante de diferentes fontes de contaminação. Os resultados anteriores sugerem que pelo menos parte desta água poderá ser utilizada com segurança para fins de irrigação e lavagem das vias públicas.

7
REFERÊNCIAS

7. REFERÊNCIAS

- Acciaiuoli, L.M.C. 1952/53. Le Portugal hydromineral. Direction Générale des Mines et des Services Géologiques. 2 volumes. Lisbonne. (I volume, 1952, 284 pp.; II Volume, 1953, 574 pp.).
- Afonso, M. J. 1997. Hidrogeologia de rochas graníticas da região do Porto. Departamento de Geologia. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. 150 pp. + Vol. Anexos. (Tese de mestrado).
- Afonso, M. J. 2003. Hidrogeologia de rochas graníticas da região do Porto (NW de Portugal). Cadernos Lab. Xeol. Laxe, A Coruña, 28: 173-192.
- Afonso, M. J. (in prep.). Hidrogeologia e hidrogeoquímica urbana da área metropolitana do Porto (NW de Portugal): implicações ambientais. Instituto Superior Técnico. Tese de Doutoramento (em preparação).
- Afonso, M. J., Chaminé, H. I., Gomes, A., Teixeira, J., Araújo, M. A., Fonseca, P. E., Carvalho, J. M., Marques, J. M., Marques da Silva, M. A., Rocha, F. T. 2004. Cartografia geológica e geomorfológica estrutural da área metropolitana do Porto: implicações na gestão dos recursos hídricos subterrâneos. Xeográfica, Revista de Xeografia, Território e Medio Ambiente, Santiago de Compostela, 4: 101-115.
- Afonso, M. J., Chaminé, H. I., Gomes, A., Fonseca, P. E., Marques, J. M., Guimarães, L., Guilhermino, L., Teixeira, J., Carvalho, J. M., Marques da Silva, M. & Rocha, F. T. 2006a. Urban hydrogeomorphology and geology of the Porto metropolitan area (NW Portugal): a multidisciplinary approach. In: Pre-Congress Proceedings of the 10th IAG International Congress - Engineering geology for tomorrow's cities, Nottingham. The Geological Society of London. 1-9 pp. (CD-Rom; IAG2006 Paper number 92)
- Afonso, M. J., Chaminé, H. I., Guimarães, L., Marques, J. M., Carreira, P., Costa, I., Teixeira, J., Martins Carvalho, J., Guilhermino, L., Fonseca, P. E. & Rocha, F. T. 2006b. Hydrochemical, ecotoxicological and isotopic approach from the Paranhos spring galleries catchworks from Porto urban area. In: Proceedings of the International Water Conference, IWC2006, Porto, Centro de Estudos de Águas/IDT-ISEP. pp. 213-222.
- Afonso M.J., Chaminé H.I., Carvalho J.M., Marques J.M., Gomes A., Araújo M.A., Fonseca P.E., Teixeira J., Marques da Silva M.A. & Rocha F.T. 2007a. Urban groundwater resources: a case study of Porto City in north-west Portugal. In: Ken W. F. Howard (Ed.), Chapter 20 - Urban Aquifer Management, Urban Groundwater: Meeting the Challenge, Selected Papers on Hydrogeology, IAH Special Publications. Taylor & Francis CRC Press, Volume SP8, pp. 278-294.
- Afonso M.J., Espinha Marques J., Marques J.M., Carreira P. M., Fonseca P.E., Gomes A., Carvalho J. M., Samper J., Borges F. S., Pires A., Rocha F.T. & Chaminé H.I. 2007b. Caracterização multidisciplinar dos recursos hídricos subterrâneos em áreas urbanas e montanhosas (Norte e Centro de Portugal): metodologias e técnicas. In: Chaminé, H. I. & Carvalho, J. M. (eds.), O valor acrescentado das Ciências da Terra no termalismo e no engarrafamento da água. Artigos seleccionados do II Fórum Ibérico de Águas Engarrafadas e Termalismo. Departamento de Engenharia Geotécnica / Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada, Instituto Superior de Engenharia do Porto. pp. 363-376.
- Afonso M. J., Marques J. M., Guimarães L., Costa I., Teixeira J., Seabra C., Rocha F. T., Guilhermino L. & Chaminé H. I. 2007c. Urban hydrogeological mapping of the Porto area (NW Portugal): a geoenvironmental perspective. In: L. Chery & Gh. de Marsily (Eds.), Aquifer Systems Management: Darcy's Legacy in a World of Impending Water Shortage, Selected papers on Hydrogeology, IAH Special Publications. Taylor & Francis CRC Press. Volume SP10. pp. 389-404.
- Aires-Barros, L. & Marques, J. M. 2000. Portugal country update. Proceedings of the World Geothermal Congress 2000, Kyushu - Tohoku, Japan, pp. 39-44.
- Almeida, A. 2001. Caracterização geoquímica e geocronológica do granito de duas micas sintectónico do Porto (NW de Portugal). In: Lago M., Arranz E. & Galé C. (eds), Proceedings III^{er} Congreso Ibérico de Geoquímica/VIII Congreso de Geoquímica de España. Instituto Tecnológico de Aragón, Zaragoza, pp. 311-315.
- Amorim, A. A. & Pinto, J. N. 2001. Porto d'agoa. Serviços Municipalizados de Águas e Saneamento do Porto. SMAS, Porto. 197 pp.
- ASTM - American Society for Testing and Materials 1980. Standard practice for conducting acute toxicity tests with fishes, macroinvertebrates and amphibians. Report E - 729-90. American Standards for Testing and Materials. Philadelphia.
- Baird DJ, Soares, AMVM, Girling A, Barber I, Bradley M & Calow, P. 1989a. The long-term maintenance of *Daphnia magna* Straus for use in ecotoxicity tests: problems and prospects. In: Lokke H, Tyle H, Bro-Rasmussen F (eds), Proceedings First European Conference on Ecotoxicology, Lyngby, pp. 144-148.

- Baird, D. J., Soares, A. M. V. M., Girling, A., Barber, I., Bradley, M., Calow, P. 1989b. The long-term maintenance of *Daphnia magna* Straus for use in ecotoxicity tests: problems and prospects. In: Lokke, H, Tyle, H, Bro-Rasmussen, F (eds) *Proceedings First European Conference on Ecotoxicology*, Lyngby, pp 144-148.
- Baptista, J., Cabral, J. & Ribeiro, A. 1998. Seismotectonics of Chaves and Moledo mineral springs in Penacova-Régua-Verin Fault Zone. In: Azerêdo, A., eds., *Actas do V Congresso Nacional de Geologia, Comunicações do Instituto Geológico e Mineiro*, Lisboa, 84 (1): 69-72.
- Bastida, F., 2005. *Geología: una visión moderna de las Ciencias de la Tierra*. Vol. I (974 pp), Vol. II (1031 pp). Trea Ciencias. Ediciones Trea, S. L., Gijón (Asturias).
- Baun, A., Jensen, S. D., Bjerg, P. L., Christensen, T. H. & Nyholm, N. 2000. Toxicity of organic chemical pollution in groundwater downgradient of a landfill (Grindsted, Denmark), *Environmental Science & Technology*. 34, 1647-1652.
- Bernardo de Sousa, M. & Sequeira, A. J. D. 1989. Notícia explicativa da Carta Geológica de Portugal, escala 1/50 000. Nº 10-D (Alijó). Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 59 pp.
- Bernardo De Sousa, M., 1982. Litostratigrafia e estrutura do "Complexo Xisto-Grauváquico ante-Ordovícico"-Grupo do Douro (Nordeste de Portugal), 222 pp. Departamento de Geociências, Universidade de Coimbra. (Tese de Doutoramento).
- Bernardo De Sousa, M., 1983. Litostratigrafia do "Complexo Xisto-Grauváquico" – Grupo do Douro (NE de Portugal). *Mem. Not.*, Coimbra, 95: 1-63.
- Bitzer, K.; Travé, A & Carmona, J. M. 2001. Fluid flow processes at basin scale. *Acta Geologica Hispanica*, Barcelona, 36 (1/2): 1-20.
- Bourbon e Noronha, T. 1885. *As aguas do Porto*. Dissertação inaugural apresentada à Escola Médico-Cirúrgica do Porto. Typ. Occidental, Porto.
- Cabral, J. (1995). Neotectónica em Portugal Continental. *Memórias Inst. Geol. Min.*, Lisboa, 31, pp. 1-265.
- Calado, C. M. A. 2001. A ocorrência de água sulfúrea alcalina no Maciço Hespérico. Quadro hidrogeológico e quimiogénese. Universidade de Lisboa. 462 pp. (Tese de doutoramento).
- Calado, C. M. A. 2003. Neotectónica e fluidos quentes de origem profunda no maciço Hespérico. *Ciências da Terra (UNL)*, Lisboa, Nº Esp. V (CD-Rom): D14-D17.
- Carrington da Costa, J. & Teixeira, C. 1957. Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50000. Notícia explicativa da Folha 9-C (Porto). *Serv. Geol. Portg.*, Lisboa. 38 pp.
- Carteado Mena, J. 1908. Contribuição para o estudo da Hygiene do Porto: analyse sanitaria do seu abastecimento em água potável. III. Estudo sobre os poços do Porto. Dissertação inaugural apresentada à Escola Médico-Cirúrgica do Porto. Typ. Encyclopedia Portuguesa, Porto, 270 pp.
- Carvalho, J. M. 2006. Prospecção e pesquisa de recursos hídricos subterrâneos no Maciço Antigo Português: linhas metodológicas. Universidade de Aveiro. 292 pp., 1 mapa. (Tese de doutoramento).
- Carvalho, J. M. & Amador, F. 2002. Águas subterrâneas: uma abordagem metodológica. *Cadernos Didáticos de Ciências*. Ministério da Educação. Departamento do Ensino Secundário. Lisboa, 2: pp. 21-38.
- Carvalho J.M. & Carvalho M.R. 2004. Recursos geotérmicos e seu aproveitamento em Portugal. *Cadernos Lab. Xeol. Laxe, A Coruña*, 29: 97-118.
- Carvalho, J. M. & Chaminé, H. I. 2004. O papel da fracturação e da alteração profunda em estudos de prospecção hidrogeológica: os casos das regiões de Oliveira de Azeméis e de Fafe (Maciço Ibérico, NW de Portugal). *Geociências, Rev. Univ. Aveiro*, 16: 13-31.
- Carvalho J.M., Monteiro da Silva J.M., Bicudo da Ponte C.A. & Cabeças R.M. 2005. Portugal country geothermal update. *World Geothermal Congress*. Antalya, Turkey, (Cd-Rom Edition).
- Chaminé, H. I. 2000. Estratigrafia e estrutura da faixa metamórfica de Espinho –Albergaria-a-Velha (Zona de Ossa-Morena): implicações geodinâmicas. Universidade do Porto. 497 pp., 2 anexos, 3 mapas. (Tese de doutoramento).
- Chaminé, H. I., Gama Pereira, L. C., Fonseca, P. E., Noronha, F. & Lemos de Sousa, M. J. 2003. Tectonoestratigrafia da faixa de cisalhamento de Porto–Albergaria-a-Velha–Coimbra–Tomar, entre as Zonas Centro-Ibérica e de Ossa-Morena (Maciço Ibérico, W de Portugal). *Cadernos Lab. Xeol. Laxe, A Coruña*, 28: 37-78.
- Choffat, P. 1917. La ligne de dépressions Régua-Verin et ses sources carbonatées. *Remarques et considérations*. *Comun. Serv. Geol. Portg*, Lisboa, 12: 35-69.
- COBA – Consultores de Engenharia e Ambiente, SA 2003. Notícia explicativa da Carta Geotécnica do Porto. 2ª edição, COBA/FCUP/CMP; Câmara Municipal do Porto, 230 pp.

- Cooney, J. D. 1995. Freshwater tests. In: Rand, GM (ed) Aquatic toxicology: effects, environmental data, and risk assessment (2nd edition), London, pp 71-102.
- Costa Cruz I. 2007. Avaliação hidrogeológica e ecotoxicológica da água subterrânea do manancial de Paranhos, Porto. Universidade de Aveiro. 174 pp. (tese de mestrado).
- Cruz, J. 2002. Reconhecimento e prospecção hidrogeológica. (versão online no site do IGM: http://www.igm.pt/edicoes_online)
- Custodio, E. & Llamas, M. R. 2001. Hidrología subterránea. Ed. Omega, 2 tomos, Barcelona, 2359 pp.
- Dewhurst, R. E., Wheeler, J. R., Chummun, K. S., Mather, J. D., Callaghan, A. & Crane, M. 2002. The comparison of rapid bioassays for the assessment of urban groundwater quality, Chemosphere. 47, 547-554.
- EPA - Environmental Protection Agency 1993. Methods for measuring the acute toxicity of effluents and receiving waters to freshwater and marine organisms, 4th ed. Office of Research and Development, Washington, DC, EPA/600/4-90/027F.
- Espinha Marques, J. 2001. Estudo de sistemas hidrominerais: o caso de Caldas do Moledo. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. 143 pp., 5 anexos. (Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica).
- Espinha Marques, J.; Chaminé, H. I.; Carvalho, J. M. & Sodré Borges, F. 2001a. Tectónica regional do sector de Caldas do Moledo–Granjão–Cidadelhe (Falha de Penacova–Régua–Verín, N de Portugal): implicações no controlo das emergências hidrominerais. Comun. Inst. Geol. Min., Lisboa, 88: 203-212.
- Espinha Marques, J., Marques, J. M., Chaminé, H. I., Graça, R. C., Carvalho, J. M., Aires-Barros, L. & Borges, F. S. 2001b. The newly described ‘Poço Quente’ thermal spring (Granjão–Caldas do Moledo sector, N Portugal): hydrogeological and tectonic implications. Geociências, Rev. Univ. Aveiro, 15: 19-35.
- Espinha Marques J., Marques J. M., Chaminé H. I., Gomes A., Fonseca P. E., Carvalho J. M., Graça R. C., Aires-Barros L. & Borges F. S. 2003a. Nascente termal do Poço Quente (Granjão–Caldas do Moledo, N de Portugal): morfoestrutura, geoquímica e hidrogeologia. Cadernos Lab. Xeol. Laxe, A Coruña, 28: 147-172.
- Espinha Marques, J.; Carvalho, J. M. & Sodré Borges, F. 2003b. O sistema hidromineral de Caldas do Moledo, Peso da Régua (Norte de Portugal). Cadernos Lab. Xeol. Laxe, A Coruña.
- Ferreira da Silva, A. J. 1889. Contribuições para a hygiene da cidade do Porto. Typ. António José da Silva Teixeira, Porto.
- Fetter, C. W. 1993. Contaminant hydrogeology. Macmillan Publishing Comp., New York, NY, USA
- Fetter, C. W. 2001. Applied hydrogeology. 4th edition, Prentice-Hall. 598 pp.
- Fontes, A. 1908. Contribuição para a Hygiene do Porto: Analyse sanitaria do seu abastecimento em água potável. I. Estudo dos Mananciais de Paranhos e Salgueiros. Dissertação inaugural apresentada à Escola Médico-Cirúrgica do Porto. Typ. Encyclopedia Portuguesa, Porto.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D’Elia, M. & Paris, M. 2002. Groundwater quality protection: a guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies. The World Bank, Washington, D. C., 103pp.
- Galgani, F.; Bocquen , G.; Cadiou, Y. 1992. Evidence of variation in cholinesterase activity in fish along a pollution gradient in the North Sea. Mar Ecol Prog Ser. 91:77-82;
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortu o, L. & Oteo, C. [coords.] 2002. Ingeniería geológica. Prentice Hall, Madrid, 715 pp.
- Guilhermino, L. 2007. Ambiente e contaminação química: a actividade das enzimas colinesterases como biomarcador ambiental e como critério de efeito em testes de toxicidade. Revista da Ordem dos Biólogos, pp. 25-27.
- Guilhermino, L., Lopes, M. C., Carvalho, A. P. & Soares, A. M. V. M. 1996a. Inhibition of acetylcholinesterase activity as effect criterion in acute tests with juvenile *Daphnia magna*, Chemosphere. 32, 727-738.
- Guilhermino, L., Lopes, M.C., Carvalho, A. P. & Soares, A. M. V. M. 1996b. Acetylcholinesterase activity in juveniles of *Daphnia magna* Straus. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 57: 979.
- Guilhermino, L., Barros, P., Silva, M. C. & Soares, A. M. V. M. 1998. Should the use of inhibition of cholinesterase as a specific biomarker for organophosphate and carbamate pesticides be questioned?, Biomarkers. 3, 157-163.
- Guilhermino, L., Lacerda, M.N., Nogueira, A.J.A. & Soares, A.M.V.M. 2000. *In vitro* and *in vivo* inhibition of *D. magna* acetylcholinesterase by surfactant agents: possible implications for contaminations biomonitoring. The Science of Total Environment 247: 137.

- Guimarães, L., Afonso, M. J., Costa, I., Chaminé, H. I. & Guilhermino, L. 2006. Ecotoxicological and hydrogeological assessment of groundwater from Porto spring galleries catchworks. Livro de Resumos do I Encontro Nacional de Pós-Graduação em Ciências Biológicas & V Simpósio de Pós-Graduação do Departamento de Biologia da Universidade de Aveiro, Aveiro, pp. 48.
- Guimarães L., Afonso, M. J., Marques, J. M., Chaminé H.I., Guilhermino, L. 2008. Integrated quality assessment of Porto spring galleries (NW Portugal). Abstracts of the 4th Iberoamerican Congress of Environmental Contamination and Toxicology, CICTA, Lisbon (Portugal).
- IGM – Instituto Geológico e Mineiro 2001. Água Subterrânea: Conhecer para Preservar o Futuro. Instituto Geológico e Mineiro Versão Online no site do IGM (http://www.igm.pt/edicoes_online/diversos/agua_subterranea/indice.htm).
- Ingebritsen, S. E. & Sanford, W. E. 1998. Groundwater in geologic processes. Cambridge University Press, 341 pp.
- Ingebritsen, S. E. & Manning, C. E. 1999. Geological implications of a permeability-depth curve for the continental crust. *Geology*, 27, 12: 1107-1110.
- ISRM - International Society for Rock Mechanics 1978. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geomechanics*. 15 (6): 319-368.
- ISRM- International Society for Rock Mechanics 1981. Basic geotechnical description of rock masses. *Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 18: 85-110.
- Keller, G. V. & Frischknecht, F. C. 1982. Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon Press.
- Klaassen, C. D., Watkins III, J. B. 2001. Princípios gerais de toxicologia. In: Toxicologia: a ciência básica dos tóxicos de Casarett & Doull's. 5ª edição. McGraw-Hill, pp. 11-31.
- Kovalevsky, V. S., Kruseman, G. P. & Rushton, K. R. 2004. An international guide for hydrogeological investigations. IHP-VI, Series on groundwater no.3. UNESCO, 430pp.
- Lindal B. 1973. Industrial and other applications of Geothermal Energy. In: Armstead H. C. H., eds., Geothermal Energy, UNESCO, Paris.
- Martí, M. A. C. 2002. Princípios de ecotoxicología. McGraw-Hill, Madrid. 314 pp.
- Mcneill, J.D. 1980a. Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Mississauga, Ontario, Geonics Limited, Technical Note TN-6, 13 pp.
- Medeiros Pereira, A. 2005. Estudo da área da nascente termal Poço Quente (Granjão, Peso da Régua): contributo da geofísica aplicada e hidrogeotecnia para a gestão de recursos hídricos subterrâneos. Relatório de Projecto de Final de Curso. Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto. 67 pp. (relatório inédito).
- Mendes, B. & Oliveira, J. F. S. 2004. Qualidade da água para consumo humano. Ed. Lidel. 626 pp.
- Monteiro, A. 1997. O clima urbano do Porto: contribuição para a definição das estratégias de planeamento e ordenamento do território. Fundação Calouste Gulbenkian/Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica. 486 pp.
- Newman, M. C., Unger, M. A. 2002. Fundamentals of ecotoxicology. 2nd edition. Lewis Publishers, New York, 458 pp.
- Nunes, L.M. 2005. Notas sobre o uso de geofísica e geostatística em hidrogeologia. Dep. de Ambiente e Ciências da Terra, Universidade do Algarve (Consultado na Internet).
- OCDE, 2000. OCDE Guidelines for testing of chemicals – Revised protocol for updating Guideline 202 – *Daphnia* sp. Acute Immobilisation Test.
- Ogilvy, R. D., Cuadra, A., Jackson, P.D. & Cuellar, V. 1991. Delineation of resistive drainage channel by EM conductivity survey. In: Geoexploration, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, Holanda. 28: 139-152.
- Oliveira, J. T., Pereira, E., Ramalho, M., Antunes, M. T. & Monteiro, J. H. [coords.] 1992. Carta Geológica de Portugal, escala 1/500000, 5ª edição. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa. (2 folhas).
- Pedrosa, M. Y. 1999. Notícia explicativa da Carta Hidrogeológica de Portugal, escala 1/200000. Folha 1. Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa.
- Pedrosa, M. Y., Brites, J. A., Pereira, A. P. 2000. Síntese de informação contida na Carta das Fontes e do Risco de Contaminação, Alto Minho, Escala 1:100.00. Jornadas Hispano-Lusas sobre as Águas Subterrâneas no Noroeste da Península Ibérica, Corunha. Inst. Geol. E Mineiro de Espanha. Madrid, 331-334 pp.
- Peters, R. H. 1987. *Daphnia* culture. In: Peters, R.H., De Bernardi, R (eds) *Daphnia*. Memorie Dell'istituto Italiano di Idrobiologia Dott. Marco de Marchi 45, pp 483-495.

- Pinto de Jesus, A. 2001. Génese e evolução da Bacia Carbonífera do Douro (Estefaniano C inferior, NW de Portugal): um modelo. Universidade do Porto. Vol. Texto: 272 pp., Vol. Atlas: 71 pp. (Tese de doutoramento).
- Rand, G. M., Wells, P. G., McCarty, L. S. 1995. Introduction to aquatic toxicology. In: Rand, GM (ed) Aquatic toxicology: effects, environmental data, and risk assessment (2nd edition), London, pp 3-66.
- Ribeiro, A., Quesada, C. & Dallmeyer, R. D. 1990. Geodynamic evolution of the Iberian Massif In: Dallmeyer, R. D. & Martínez-García, E., Eds, Pre-Mesozoic Geology of Iberia. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. pp. 397-410.
- Rocha, M. 1981. Mecânica das Rochas LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 445 pp.
- Rodríguez J.L.S. & Bedmar, A. P. 2003. Técnicas Hidrológicas en Investigación Geotécnica. Cedex – Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid, 158 pp.
- Schoeller, H. 1962. Les eaux souterraines. Masson & cie, Paris. 642 pp.
- Schoeller, H. 1982. Sur les eaux thermominérales et leur origine. In: Romariz, C., (ed.), 3ª Semana de Hidrogeologia, Universidade de Lisboa. pp. 37-43.
- Seabra, C. 2006. Potenciais fontes de contaminação da água subterrânea na área envolvente ao manancial de Paranhos (cidade do Porto): uma abordagem metodológica. Relatório de Projecto de Final de Curso. Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto. 152 pp. (relatório inédito).
- Sheehan, P., Dewhurst, R.E., James, S., Callaghan, A., Connon, R., Crane, M. 2003. Is there a relationship between soil and groundwater toxicity? Environmental Geochemistry and Health. 25: 9–16.
- SMAS – Serviços Municipalizados de Águas e Saneamento do Porto 1961. Mananciais de Paranhos e Salgueiros: situação e distribuição em relação à actual urbanização. SMAS, Porto. 28 pp.
- Teixeira, C.; Fernandes, A. P. & Peres, A. 1967. Notícia explicativa da Carta Geológica de Portugal na escala 1/50 000. Folha 10-C (Peso da Régua). Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa. 60 pp.
- UNESCO, 1983. International legend for hydrogeological maps. Revised Edition, Unesco, Paris.
- UNESCO, 1992. International Glossary of Hydrogeology, 2nd ed., Unesco, Paris, 413 pp.
- União Europeia 2000. Directiva 2000/60/EC do Parlamento e Conselho Europeus. Jornal Oficial das Comunidades Europeias, L327. pp.1-73.
- Velhas, E. 1991. A bacia hidrográfica do Rio Leça: estudo hidroclimatológico. Geografia, Rev. Fac. Letras, Porto, 7 (1ª série): 139-251.
- Walker, C. H., Hopkin, S. P., Sibly, R. M. & Peakall, D. B. 2001. Principles of ecotoxicology. 2nd edition. Taylor & Francis, London.
- Zaporozec, A. (ed.) 2004. Groundwater contamination inventory: a methodological guide with a model legend for groundwater contamination inventory and risk maps. IHP-VI, series on groundwater, 2. UNESCO, Paris, France.
- Zaporozec, A. & Miller, J. C. 2000. Groundwater Pollution. UNESCO, Paris, France, 24 pp.

ANEXOS

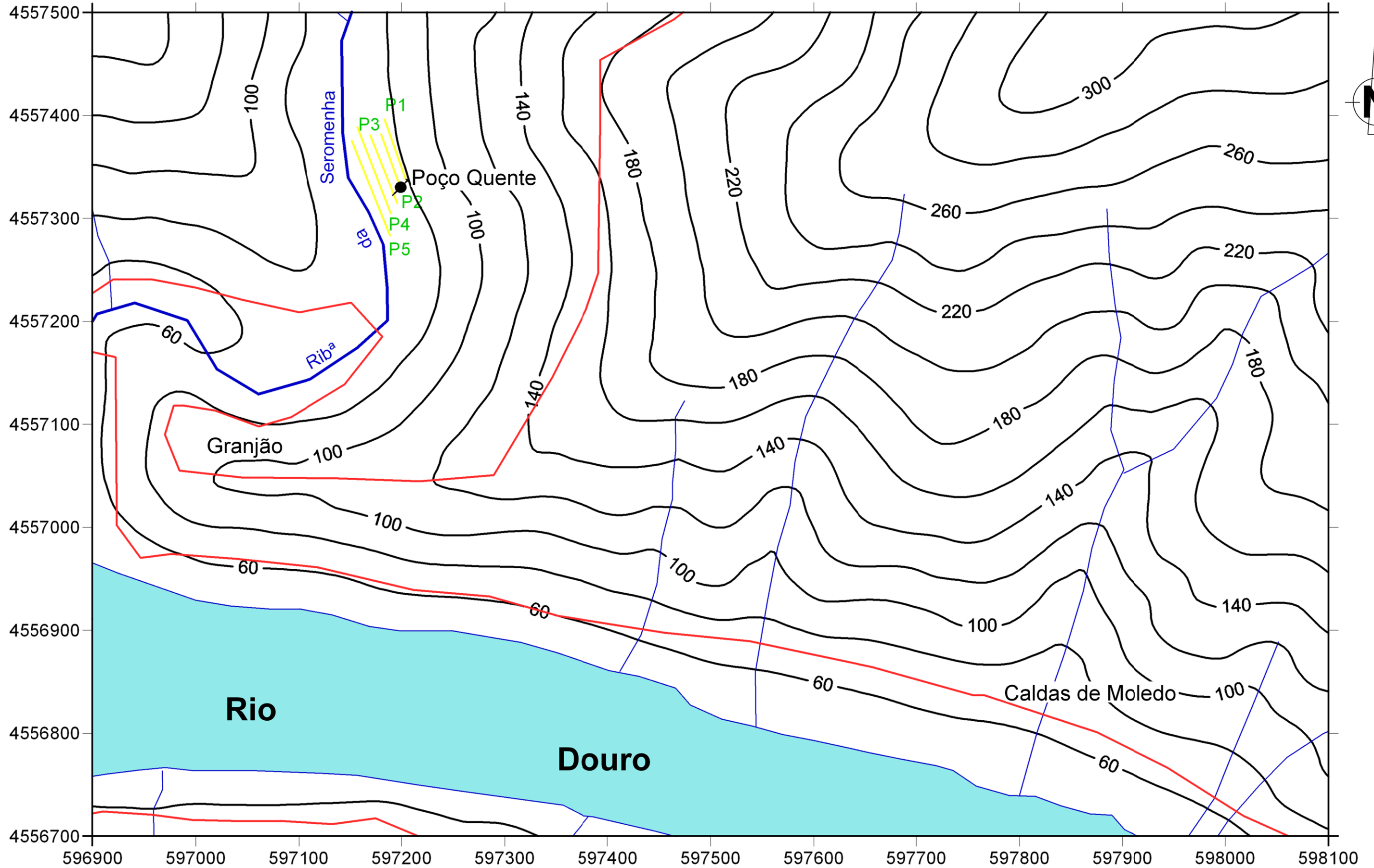
ANEXO 1

PAINEL DE FOTOS DA LOCALIZAÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO



ANEXO 2

PLANTA DE LOCALIZAÇÃO DOS PERFIS DE GEOFÍSICA (ELECTROMAGNÉTICA)



Legenda

- Curvas de nível
- Linha de água
- Estrada
- Perfil geofísico (electromagnética)

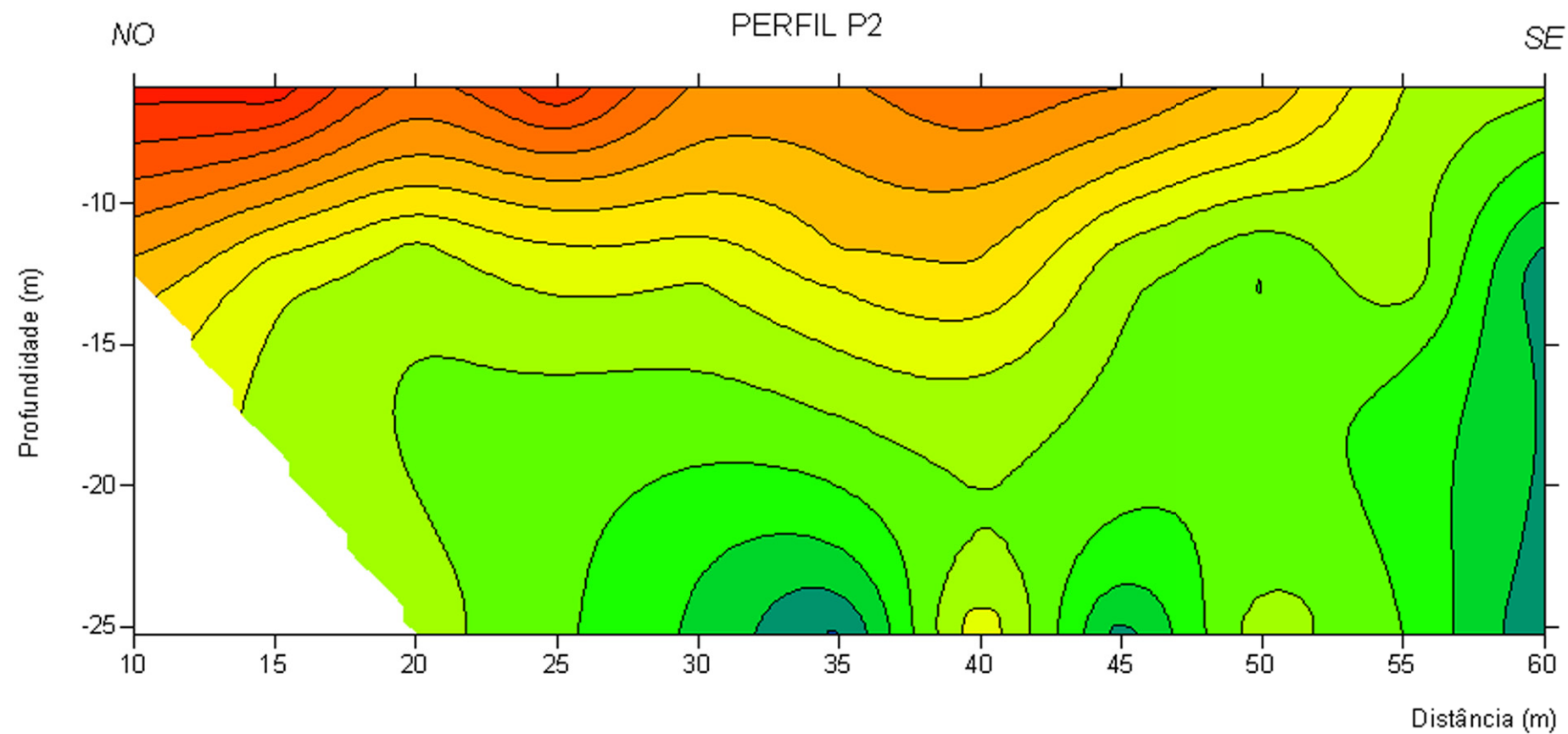
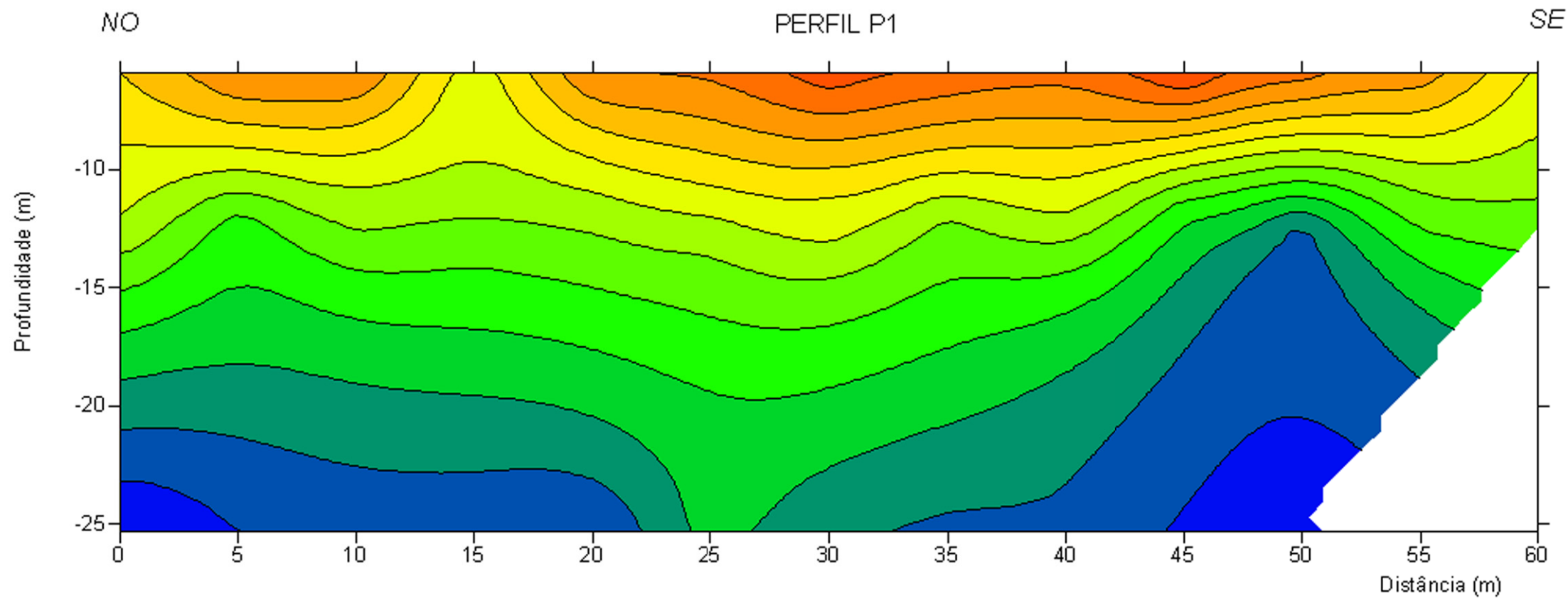
0 200 m

UTM Fuso 29 - Datum Europeu 1950

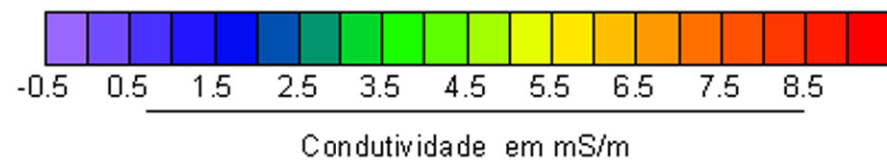
<div><div>isep</div><div>INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE PORTO</div></div>		DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA	
Autor: A. Medeiros	Rev.:HIC, MJA	Avaliação multitécnica em hidrogeologia ambiental e suas implicações na gestão de recursos hídricos subterrâneos	
Escala: 1/7000			
Data: 27/06/2008			
Desenho nº:1	Folha nº: 1/1	Planta de localização dos perfis de geofísica (electromagnética)	
Versão: Final			

ANEXO 3

SECÇÕES DE CONDUTIVIDADE ELÉCTRICA (PERFIL P1 E PERFIL P2)



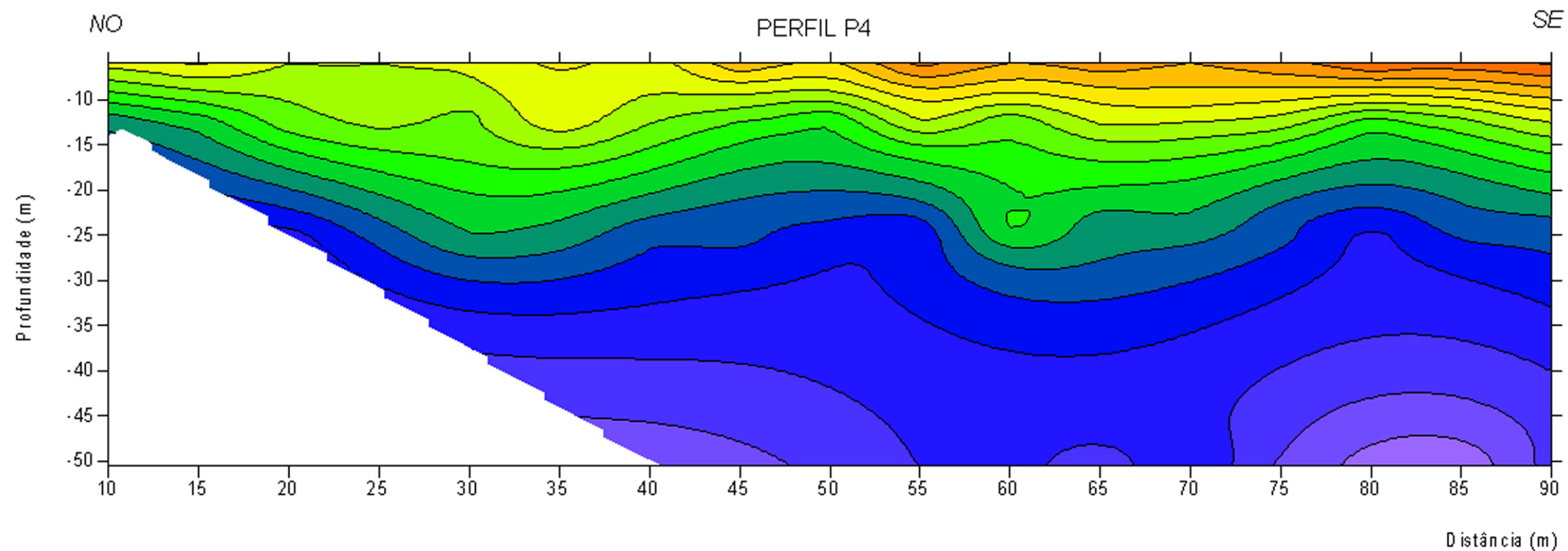
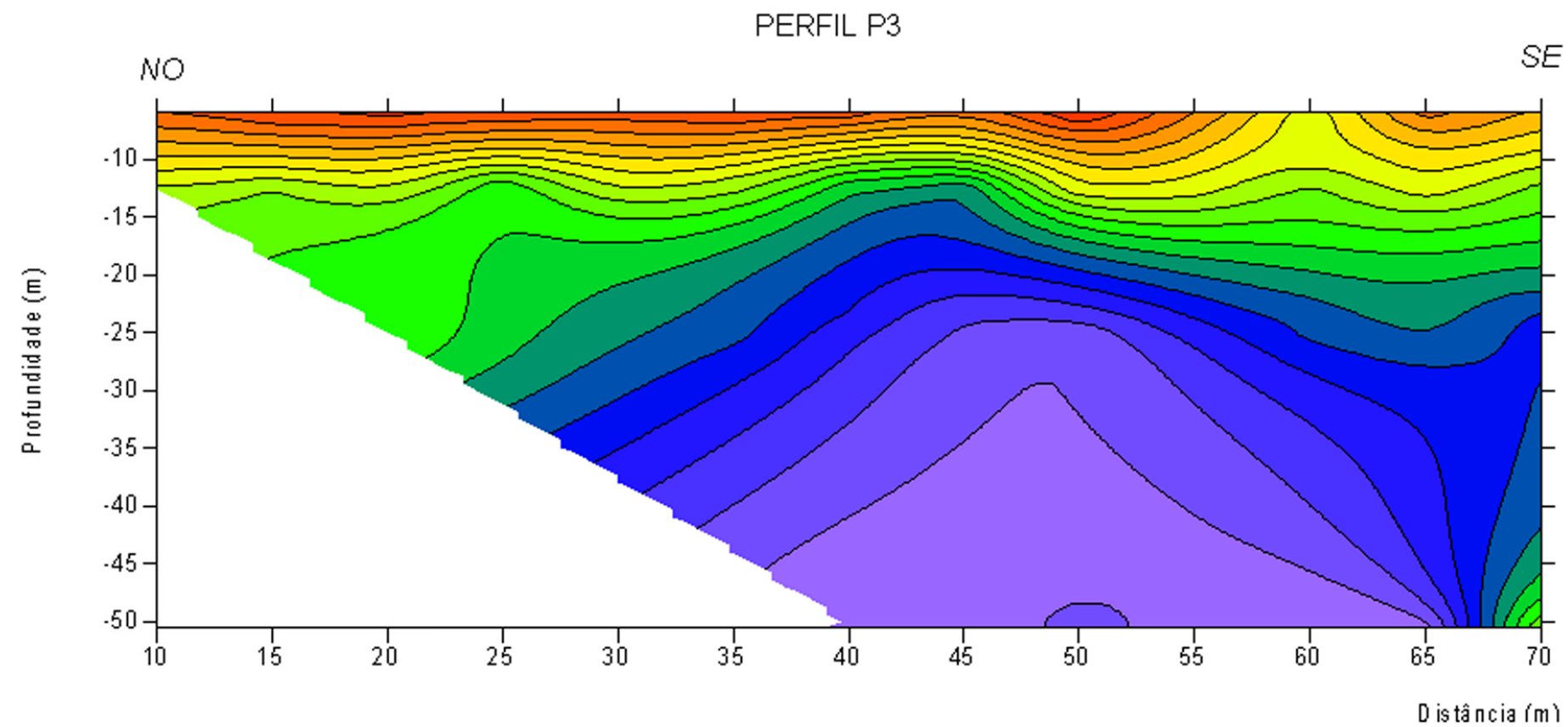
Legenda



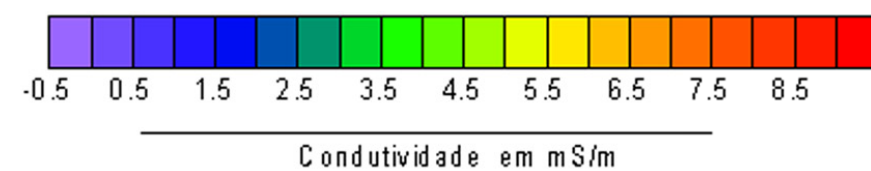
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA		
Autor: A. Medeiros	Rev.: HIC, MJA	Avaliação multitécnica em hidrogeologia ambiental e suas implicações na gestão de recursos hídricos subterrâneos
Escala: 1/250		
Data: 27/06/2008		Secções de condutividade eléctrica (perfil P1 e perfil P2)
Desenho nº: 2	Folha nº: 1/1	
Versão: Final		

ANEXO 4

SECÇÕES DE CONDUTIVIDADE ELÉCTRICA (PERFIL P3 E PERFIL P4)



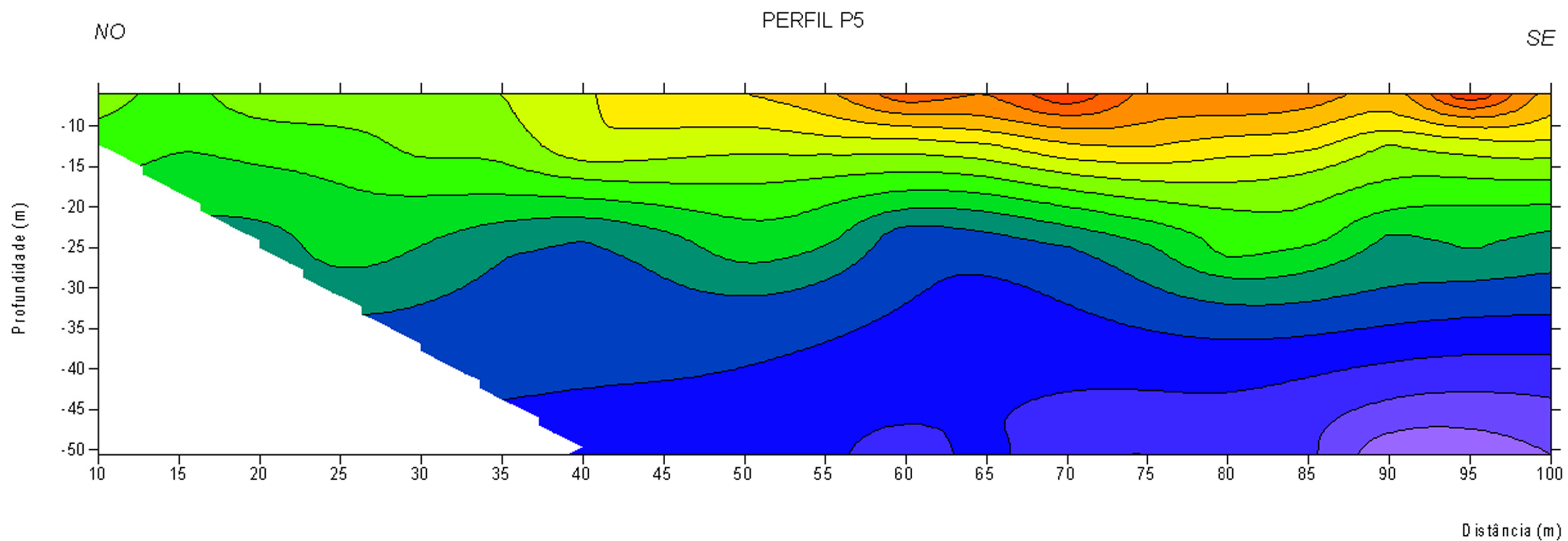
Legenda



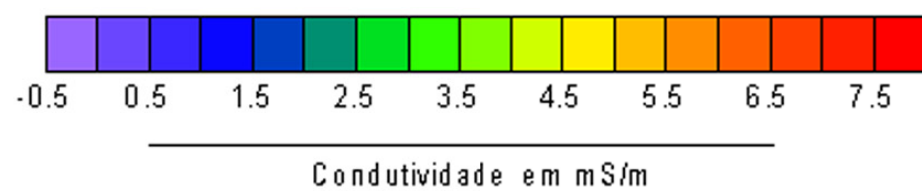
<div> <div>isep</div> <div>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA</div> </div>		
Autor: A. Medeiros	Rev.: HIC, MJA	Avaliação multitécnica em hidrogeologia ambiental e suas implicações na gestão de recursos hídricos subterrâneos
Escala: H 1/300 V 1/600		
Data: 27/06/2008		Secções de condutividade eléctrica (perfil P3 e perfil P4)
Desenho nº: 3	Folha nº: 1/1	
Versão: Final		

ANEXO 5

SECÇÕES DE CONDUTIVIDADE ELÉCTRICA (PERFIL P5)



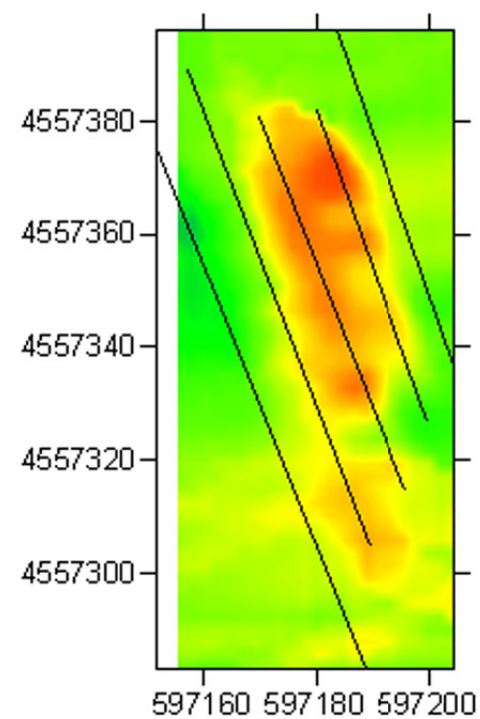
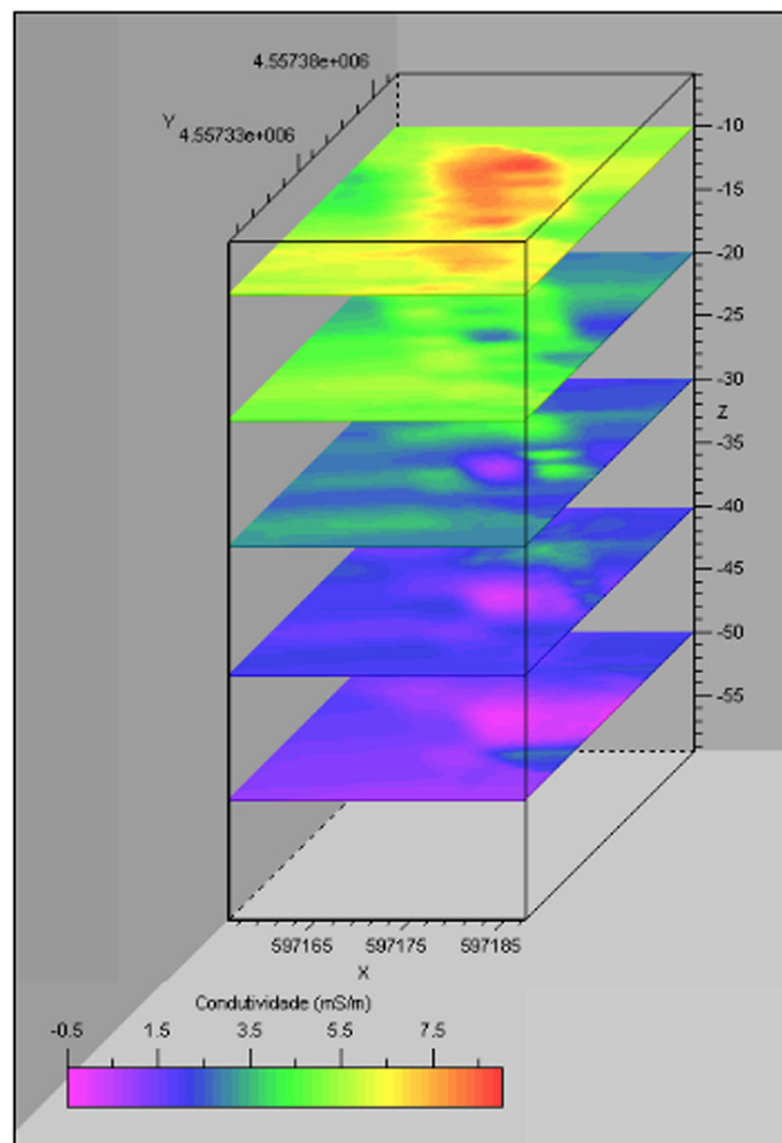
Legenda



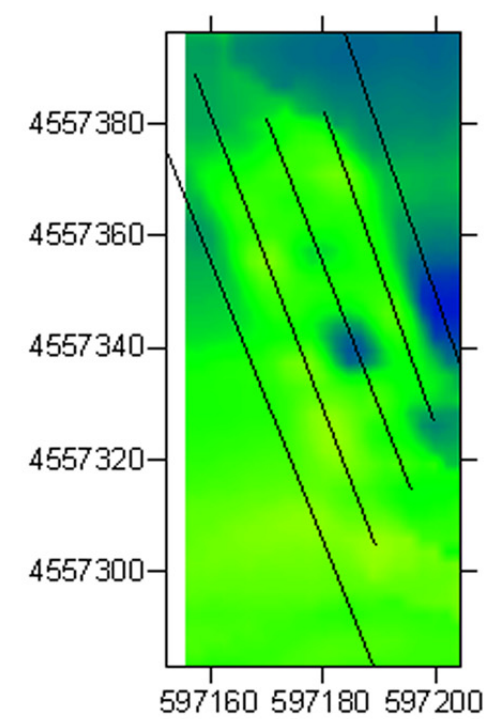
<div><div>isep</div><div><div>INSTITUTO</div><div>SISTEMAS DE</div><div>ENGENHARIA</div></div></div>		DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA	
Autor: A. Medeiros	Rev.:HIC, MJA	Avaliação multitécnica em hidrogeologia ambiental e suas implicações na gestão de recursos hídricos subterrâneos	
Escala: H 1/300 V 1/600			
Data: 27/06/2008			
Desenho nº: 4	Folha nº: 1/1	Secção de condutividade eléctrica (perfil P5)	
Versão: Final			

ANEXO 6

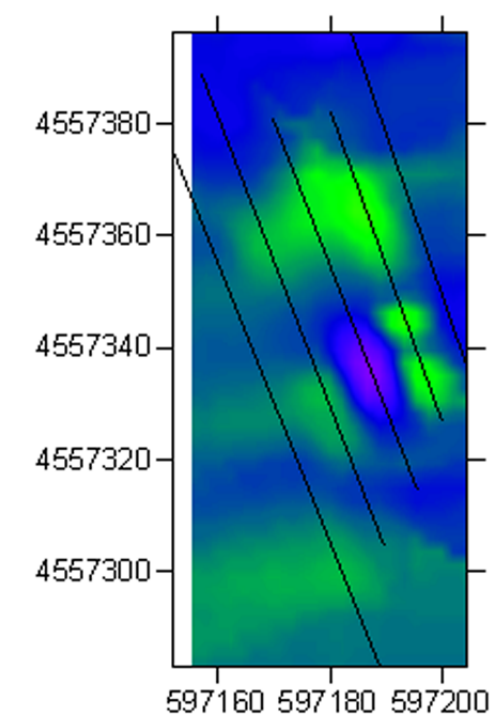
MAPEAMENTO ELECTROMAGNÉTICO



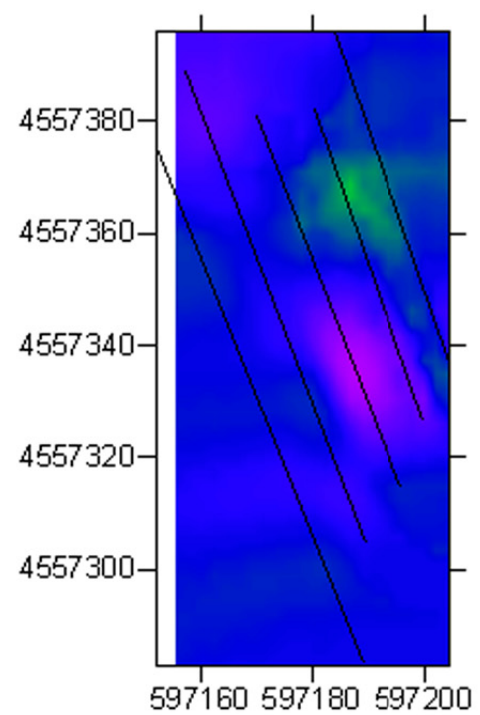
a) Profundidade teórica 10 m



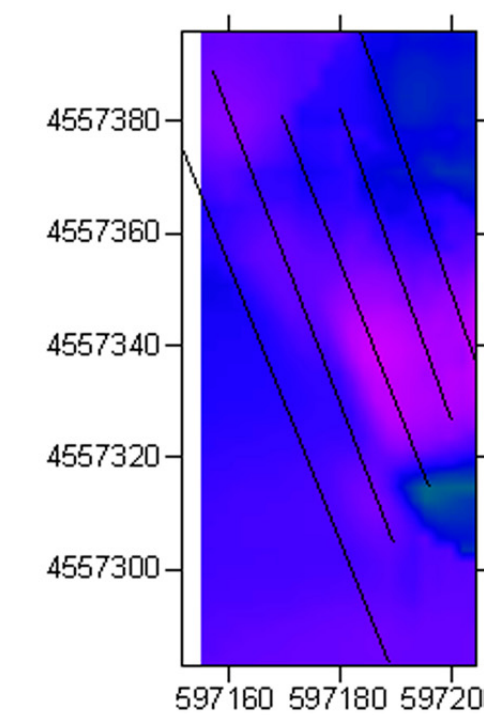
b) Profundidade teórica 20 m



c) Profundidade teórica 30 m



d) Profundidade teórica 40 m



e) Profundidade teórica 50 m

<div><div><div>isep</div><div>INSTITUTO SUPER DE ENGENHARIA DO PORTO</div></div><div>DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA</div></div>			
Autor: A. Medeiros		Rev.:HIC, MJA	
Escala: 1/500		<div>Avaliação multitécnica em hidrogeologia ambiental e suas implicações na gestão de recursos hídricos subterrâneos</div>	
Data: 27/06/2008			
Desenho nº: 5	Folha nº: 1/1		
Versão: Final		Mapeamento electromagnético	

ANEXO 7

FICHAS DE CAMPO (GEOFÍSICA)

Estação (m)	Condutividade (mS/m)		Condutividade (mS/m)	
Distâncias	BV-10	BH-10	BV-20	BH-20
0	6	5,2	4,8	1,5
5	7	3,6	4	2
10	7	4,6	4,6	2,2
15	5,2	3,5	5,4	2,2
20	7	4,2	5	2
25	7,1	4,4	5,4	3,2
30	7,8	6,1	4,4	2,6
35	7,4	4,7	4,2	2,4
40	7,2	4,9	4,9	2,4
45	8	3,6	3,4	2
50	7,2	0,8	4,3	1,8
55	6,8	3,6		
60	5,4	4,2		
NOTA : BV-10 - Bobine vertical cabo 10 metros				

Tabela 1 - Dados de leituras do trabalho de campo do perfil P1.

Estação (m)	Condutividade (mS/m)		Condutividade (mS/m)	
Distâncias(m)	BV-10	BH-10	BV-20	BH-20
60	4,6	2,2	3,2	2,6
55	5,0	5,6	4,2	4,0
50	6,4	4,0	4,0	4,8
45	7,0	4,8	4,6	2,8
40	7,4	6,2	5,8	5,4
35	6,9	4,4	7,2	2,4
30	6,9	4,2	6,0	3,4
25	8,4	5,3	5,2	4,9
20	7,3	4,9	4,4	6,2
15	8,8	4,1		
10	8,7	5,2		

Tabela 2 - Dados de leituras do trabalho de campo do perfil P2.

Estação (m)	Condutividade (mS/m)		Condutividade (mS/m)		Condutividade (mS/m)	
Distância (m)	BV-10	BH-10	BV-20	BH-20	BH-40	BH-40
10	7,5	3,9				
15	8,0	3,4				
20	8,2	4,9	5,2	5,6		
25	8,0	3,4	4,0			
30	7,8	5,6	4,6			
35	8,0	5,8	3,8	3,0		
40	7,8	3,6	3,0	1,2	1,4	-0,5
45	7,2	2,4	3,2		0,7	-0,7
50	8,5	7,0	4,0	-0,8	1,3	1,2
55	7,0	6,7	4,0	1,2	1,4	-0,2
60	5,2	4,6	4,6	3,0	1,2	-0,3
65	7,2	6,2		3,2	2,0	-0,3
70	6,4	4,7	4,2	2,2	1,2	9,0

Tabela 3 - Dados de leituras do trabalho de campo do perfil P3.

Estação (m)	Condutividade (mS/m)		Condutividade (mS/m)		Condutividade (mS/m)	
Distâncias	BV-10	BH-10	BV-20	BH-20	BH-40	BH-40
10	5,2	1,0				
15	5,6	2,4				
20	5,0	5,0	3,6	0,4		
25	5,0	5,3	4,2	2,4		
30	5,1	5,6	3,2	4,2		
35	5,6	5,9	5,0	4,0		
40	5,2	4,8	4,4	3,0	1,4	-0,4
45	6,4	3,8	4,4	3,4	1,0	-0,2
50	5,9	4,0	3,2	2,0	1,6	0,2
55	7,2	6,0	4,2	2,0	1,2	0,9
60	6,5	4,4	4,0	4,2	3,2	1,2
65	6,8	5,3	5,0		1,6	0,7
70	6,5	4,2	6,0		2,4	1,5
75	6,9	4,3	5,4	3,0	1,4	0,4
80	7,5	2,6	5,0	1,4	1,5	-0,2
85	7,3	4,4	4,4	2,0	2,5	-0,4
90	7,6	5,2	5,0	2,2	2,3	0,7

Tabela 4 - Dados de leituras do trabalho de campo do perfil P4.

Estação (m)	Condutividade (mS/m)		Condutividade (mS/m)		Condutividade (mS/m)	
Distâncias	BV-10	BH-10	BV-20	BH-20	BH-40	BH-40
10	3,8	3,6				
15	3,2	3,2				
20	4,0	3,6	2,8	2,4		
25	3,8	3,4	3,2	4,0		
30	3,8	4,2	3,2	3,6		
35	4,0	4,0	3,4	3,2		
40	4,4	5,0	4,0	3,4	0,5	1,2
45	5,0	4,8	3,8	3,6	1,0	1,2
50	5,0	4,4	4,0	4,4		1,6
55	5,4	4,2	4,4	3,8	1,5	1,3
60	6,4	4,2	4,4		0,1	0,7
65	6,0	4,4	4,6	2,8	0,8	1,2
70	7,0	5,6	4,4	2,8	1,4	0,5
75	5,8	5,2	5,0	3,6	1,5	0,5
80	6,0	4,4	5,2	5,0	1,5	0,8
85	5,9	4,0	5,4	3,8	2,6	0,6
90	5,2	3,4	4,6	3,4	1,4	-0,4
95	7,0	4,2	4,4	3,8	1,5	-0,5
100	5,2	4,0	4,8	3,2	1,5	-0,2

Tabela 5 - Dados de leituras do trabalho de campo do perfil P5.

ANEXO 8

FICHAS DE INVENTÁRIO

FICHA DE INVENTÁRIO

Designação: Ribeira da Seromenha

Nº inventário 1



Planta de Localização

Fotografia

Mapa topográfico _____ Militar _____ Folha Nº: _____ 126 _____ escala: _____ 1:25 000 _____ .
Mapa geológico _____ Peso da Régua _____ Folha Nº: _____ escala: _____ 1:50 000 _____ .

Cota (m):_____

Condições de acesso: Estradão de acesso a terreno particular

Breve descrição:

Ponto de descarga simples ☐ Grupo de exsurgências ☐ Área de descarga: ____x____ m
Exsurgência permanente ☐ Exsurgência temporária ☐

A água flui através de:

Rocha ☐ Solo ☐ Outra ☐ Qual? Ribeira
Descontinuidade ☐ Outra ☐ Qual? _____

Aspecto superfície rocha/solo: esbranquiçada ☐ avermelhada ☐ acastanhada ☐

Características geológicas, hidrogeológicas e geotécnicas

Unidade geológica regional _____ Rochas Metassedimentares _____

Unidade hidrogeológica local ou regional _____

Litologia _____ Metassedimentos_____

Estrutura ____ Falha____

Grau de alteração (W) W1-2

Qualidade da água e fluxo

Dia: 8/Junho /2005 Hora: 16 : 00 min .

Cheiro_____ cor Transparente turbidez_____

Outras observações: plantas ☐ animais ☐ incrustações ☐

Fluxo _____ l/s (medido com _____)

Temperatura (°C) água 22 Temperatura ar 30 pH 6.9 Condutividade eléctrica 110 µS/cm

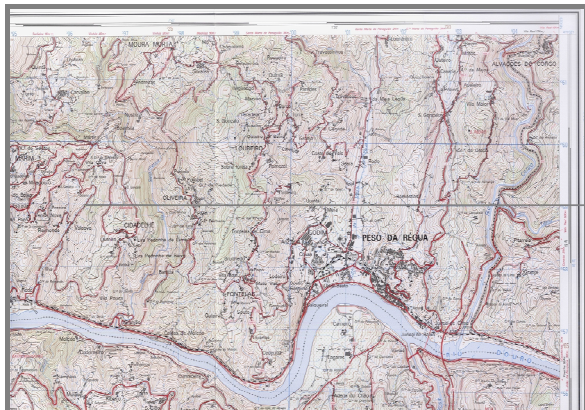
Amostra para análise laboratorial nº _____ data colheita _____

Elaborado por Alzira de Medeiros Data 8/Junho /2005.

FICHA DE INVENTÁRIO

Designação: Poço Quente

Nº inventário 2



Planta de Localização

Fotografia

Mapa topográfico Militar Folha Nº: 126 escala: 1:25 000.
Mapa geológico Peso da Régua Folha Nº: escala: 1:50 000.

Cota (m):

Condições de acesso: Terreno particular

Breve descrição:

Ponto de descarga simples ☐ Grupo de exsurgências ☐ Área de descarga: x m
Exsurgência permanente X Exsurgência temporária ☐

A água flui através de:

Rocha X Solo ☐ Outra ☐ Qual? Poço Quente
Descontinuidade X Outra X Qual? Filão

Aspecto superfície rocha/solo: esbranquiçada ☐ avermelhada ☐ acastanhada ☐

Características geológicas, hidrogeológicas e geotécnicas

Unidade geológica regional Granito

Unidade hidrogeológica local ou regional Granito

Litologia Granito

Estrutura Falha/Filão

Grau de alteração (W) W1-2

Qualidade da água e fluxo

Dia: 8/Junho /2005 Hora: 16 : 57 min .

Cheiro a água tem cheiro a ovos podres cor Transparente turbidez
Outras observações: plantas ☐ animais ☐ incrustações ☐

Fluxo l/s (medido com)

Temperatura (°C) água 25 Temperatura ar 30 pH 6.9 Condutividade eléctrica 300 µS/cm

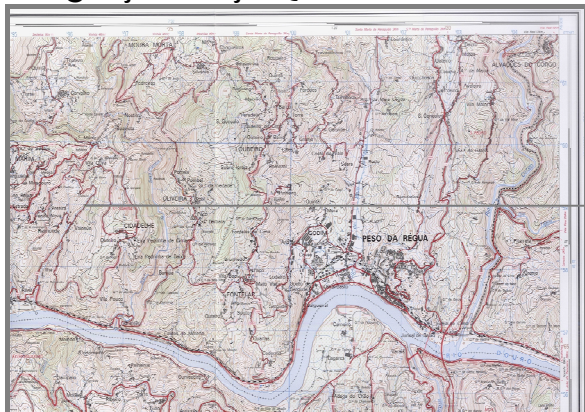
Amostra para análise laboratorial nº data colheita

Elaborado por Alzira de Medeiros Data 8/Junho /2005.

FICHA DE INVENTÁRIO

Designação: Poço Quente

Nº inventário 3



Planta de Localização

Fotografia

Mapa topográfico Militar Folha Nº 126 escala: 1:25 000.
Mapa geológico Peso da Régua Folha Nº: escala: 1:50 000.

Cota (m):

Condições de acesso: Terreno particular

Breve descrição:

Ponto de descarga simples ☐ Grupo de exsurgências ☐ Área de descarga: x m
Exsurgência permanente X Exsurgência temporária ☐

A água flui através de:

Rocha X Solo ☐ Outra ☐ Qual? Poço Quente
Descontinuidade X Outra X Qual? Filão

Aspecto superfície rocha/solo: esbranquiçada ☐ avermelhada ☐ acastanhada ☐

Características geológicas, hidrogeológicas e geotécnicas

Unidade geológica regional Granito
Unidade hidrogeológica local ou regional Granito

Litologia Granito
Estrutura Falha/Filão
Grau de alteração (W) W1-2

Qualidade da água e fluxo

Dia: 8/Junho /2005 Hora: 17 : 00 min

Cheiro a água tem cheiro a ovos podres cor Transparente turbidez

Outras observações: plantas ☐ animais ☐ incrustações ☐

Fluxo l/s (medido com)

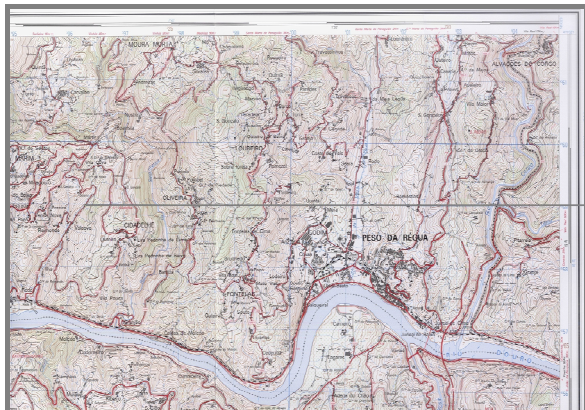
Temperatura (°C) água 24 Temperatura ar 30 pH 6.9 Condutividade eléctrica 280 µS/cm
Amostra para análise laboratorial nº data colheita

Elaborado por Alzira de Medeiros Data 8/Junho /2005

FICHA DE INVENTÁRIO

Designação: Poço Quente

Nº inventário 4



Planta de Localização

Fotografia

Mapa topográfico _____ Militar _____ Folha N.º: _____ 126 _____ escala: _____ 1:25 000 _____.

Mapa geológico _____ Peso da Régua _____ Folha N.º: _____ escala: _____ 1:50 000 _____.

Cota (m):_____

Condições de acesso: Terreno particular

Breve descrição:

Ponto de descarga simples ☐ Grupo de exsurgências ☐ Área de descarga: ____x____ m
Exsurgência permanente ☐ Exsurgência temporária X

A água flui através de:

Rocha X Solo ☐ Outra ☐ Qual? Poço Quente
Descontinuidade ☐ Outra ☐ Qual? _____

Aspecto superfície rocha/solo: esbranquiçada ☐ avermelhada ☐ acastanhada ☐

Características geológicas, hidrogeológicas e geotécnicas

Unidade geológica regional _____

Unidade hidrogeológica local ou regional _____

Litologia _____ Granito _____
Estrutura _____ Falha/Filão _____
Grau de alteração (W) _____ W1-2 _____

Qualidade da água e fluxo

Dia: 8/Junho /2005 Hora: 17 : 26 min .

Cheiro a água tem cheiro a ovos podres cor Transparente turbidez_____

Outras observações: plantas ☐ animais ☐ incrustações ☐

Fluxo l/s (medido com)

Temperatura (°C) água 24 Temperatura ar 23 pH 7.1 Condutividade eléctrica 280 µS/cm

Amostra para análise laboratorial nº _____ data colheita _____

Elaborado por Alzira de Medeiros **Data** 8/Junho /2005 .

ANEXO 9

FICHA DAS ESTAÇÕES GEOMECÂNICAS

Esclerômetro Portátil (Martelo de Schmit)

Estações	Litologia / Grau de Alteração	Leituras dureza de Schmidt (r, ressalto)	Leituras máximas	Média das leituras máximas	Resistência à compressão simples (MPa)	Classificação da Resistência (seg. ISRM, 1981)	Foto
E1	Granito (w1-2)	59	62.5	60.4	240	S1-2	
		54	62				
		58	59.5				
		62.5	59				
		58.5	59				
		59					
		53					
		52					
		62					
		59.5					
E2	Granito (w1-2)	48	59	55.1	190	S1-2	
		51	56				
		54	54.5				
		49	54				
		59	52				
		54.5					
		52					
		51					
		56					
		50					
E3	Corneana metapelítica, quártzica (w1-2)	34	53	46.6	140	S1-2	
		53	53				
		37	44				
		27	42				
		53	41				
		44					
		42					
		22					
		41					
		36					